Cours d'histoire des sciences

EPITECH 1ère année
2005-2006

Bertrand LIAUDET

Histoire de la représentation de l'Univers

2 : La révolution copernicienne : le système héliocentrique keplero-newtonien

Une longue attente

Situation à la fin de l'empire romain

- Déclin de l'empire romain (empire d'Orient en 286).
- **Défiance vis-à-vis de la philosophie et de son scepticisme** (les stoïciens et les sceptiques).
- Système aristotélicien qui fige le monde. Une **physique et une astronomie en « stand by** ».
- Une physique et une astronomie gangrenée par **des occultismes** variés : magie, astrologie, alchimie, hermétisme (ésotérismes en tout genre). Exemple : 1) Le « Corpus Hermeticum » présente l'alchimie comme un art initiatique, censé permettre à l'homme de trouver l'or en lui-même. Pour ce faire, il doit connaître les lois de sympathie et d'antipathie qui régissent les rapports des objets avec les astres. Cette connaissance ne peut être apportée par la seule raison : il faut la révélation des textes du Corpus. Comme ils sont particulièrement obscurs, leur élucidation demande des « maîtres ». 2) Ptolémée est à la fois l'auteur de l'Almageste et celui du Tétrabile.
- D'un autre côté, Plotin développe une forme mystique du platonisme : **le néo-platonisme** (qui aboutit à une forme d'ésotérisme).
- **Crise religieuse** et naissance du christianisme (religion d'Etat en 391)

Ainsi, d'un côté, il n'y a plus de « physiciens » (Archimède et Hipparque sont les derniers grands noms). De l'autre on retrouve, en quelque sorte, les occultismes (toujours fondés sur des mythes) et l'idéalisme mathématique néo-platonicien pour aller à l'assaut de la forteresse aristotélicienne.

C'est à travers ces deux courants (occultisme et idéalisme mathématique) que l'hellénisme ressurgira au XVIè siècle, en réaction à la philosophie aristotélico-thomiste.

Mais dans la situation de crise de la fin de l'empire romain, c'est le christianisme qui l'emporte, contre les physiciens (déjà moribonds), les philosophes et les tous les ésotérismes (qu'ils soient à tendance physique ou à tendance mathématique).

> *« La science que les hommes estiment le plus, est celle qui a pour objet le ciel et la terre ; mais une autre science bien plus estimable est la connaissance de soi-même. Oui, l'homme qui connaît sa propre faiblesse, mérite d'être loué au-dessus du philosophe qui, tout bouffi d'orgueil, étudie le cours des astres ou pour y faire des découvertes nouvelles, ou pour vérifier les anciennes. […] Toute science qui réunit la*

componction[1] à l'étude, n'est point la science qui enfle, mais la charité qui édifie. Et en effet celui qui la possède a fait un choix judicieux et il a préféré connaître sa propre faiblesse, plutôt que de mesurer l'étendue de l'univers, les profondeurs de la terre et la hauteur des cieux. Mais surtout il est digne d'éloges, parce qu'à cette science il joint la componction du cœur, c'est-à-dire la tristesse de l'exil et le regret d'être éloigné de la patrie céleste, et séparé du Dieu souverainement heureux. »

Augustin (354-430), Trinité, Livre IV, préface

Augustin va réaliser une synthèse du christianisme originel et de l'idéalisme ancien. Cette synthèse s'imposera à la pensée théologico-philosophique pendant 800 ans, jusqu'à la nouvelle synthèse thomiste.

Principale régression : la Terre redevient plate !

Dès le début du christianisme, la sphéricité de la Terre pose un problème. Quel rapport entre ce monde des Antipodes et le Déluge ?

La Terre est alors représentée comme un grand carré ou un disque plat où l'Océan, élément inquiétant et mystérieux, s'étend jusqu'aux murs qui sont supposés clôturer l'Univers et supporter la voûte céleste. Ca donne des « Mappemonde en TO » :

La plupart des représentations médiévales ne considèrent que la Terre habitée : ce sont les "mappemondes". Elles prennent souvent la forme traditionnelle du "T dans l'O" : les trois parties de la terre habitée, inscrites dans le O de l'anneau océanique, sont séparées par un T dont la hampe figure la Méditerranée et les branches l'une le Tanaïs (le Don), limite traditionnelle entre l'Europe et l'Asie, l'autre le Nil, partage ordinaire de l'Asie et de l'Afrique. Ce monde clos par le cercle océanique résulte du partage réalisé après le Déluge entre les trois fils de Noé.

http://expositions.bnf.fr/lamer/

[1] Sentiment de tristesse, éprouvé par le croyant devant son indignité à l'égard de Dieu.

La science arabe : Al-Khwarizmi, Alhazen et Averroès

Dès le VIIIe siècle, les Arabes vont traduire en arabe deux ouvrages de Ptolémée : l'Almageste, et la Geographia.

Al-Khwarizmi (vers 780-850) est principalement connu pour avoir développé l'algèbre. Il s'est aussi efforcé d'améliorer la géographie de Ptolémée et les méthodes de projection cartographique. Il a aussi élaboré des tables astronomiques. On reviendra sur Al-Khwarizmi à cette occasion.

Ibn El Khaytam (965-1039) connu en occident sous le nom de **Alhazen** pour son « Traité d'Optique ».

Alhazen combat la théorie du rayon visuel : depuis les Grecs, on croyait que la lumière est un « feu » envoyé par l'œil et permettant de voir les objets. Alhazen « prouve » que la lumière a une existence propre, indépendant de l'observateur.

En introduisant la théorie du rayon lumineux à la place de celle du rayon visuel, Alhazen permet la fondation de l'optique en tant que science.

Ibn Rushd (1126-1198) connu en occident sous le nom d'**Averroès**, écrira :

> *« Il est absolument impossible qu'il y ait des épicycles. Un corps qui se meut circulairement, se meut nécessairement de telle sorte que le centre de l'Univers soit le centre de son mouvement. Si le centre de sa révolution n'était pas le centre de l'Univers, il aurait donc un centre hors de celui-ci ; il faudrait alors qu'il existât une seconde Terre, en dehors de cette Terre-ci, et cela est impossible selon les principes de la Physique. On peut en dire autant de l'excentrique dont Ptolémée suppose l'existence. Si les mouvements célestes admettaient plusieurs centres, il y aurait plusieurs corps graves extérieurs à cette terre ».*

D'autre part, le point équant qui décentre la Terre, est aussi une violation de la perfection du mouvement circulaire.

La scolastique et l'aristotélico-thomisme : Thomas d'Acquint (1225-1274)

Gerbert d'Aurillac, pape en l'an 1000, revint aux conceptions grecques et remit au goût du jour la sphéricité de la Terre. Mais il reste isolé.

Dans sa « Somme théologique », **Thomas d'Acquint** (1225-1274) intègre Aristote dans le christianisme. C'est la période de fondation des Universités. On en revient donc à une image du monde ptoléméenne.

C'est ce qui va servir de base à la scolastique : l'école qui dominera l'occident jusqu'à la révolution copernicienne.

Les débuts de la Renaissance

Avec la renaissance, on peut dire qu'en quelque sorte, les physiciens et les mathématiciens (platoniciens) reprennent l'assaut de la forteresse aristotélico-thomiste.

Les physiciens, par les géographes et la découverte du Nouveau Monde. Ces découvertes contredisent la géographie de Ptolémée et prouvent la rotondité de la Terre (Magellan, 1522).

Les mathématiciens, par le renouveau de la pensée grecque du fait de la prise de Constantinople.

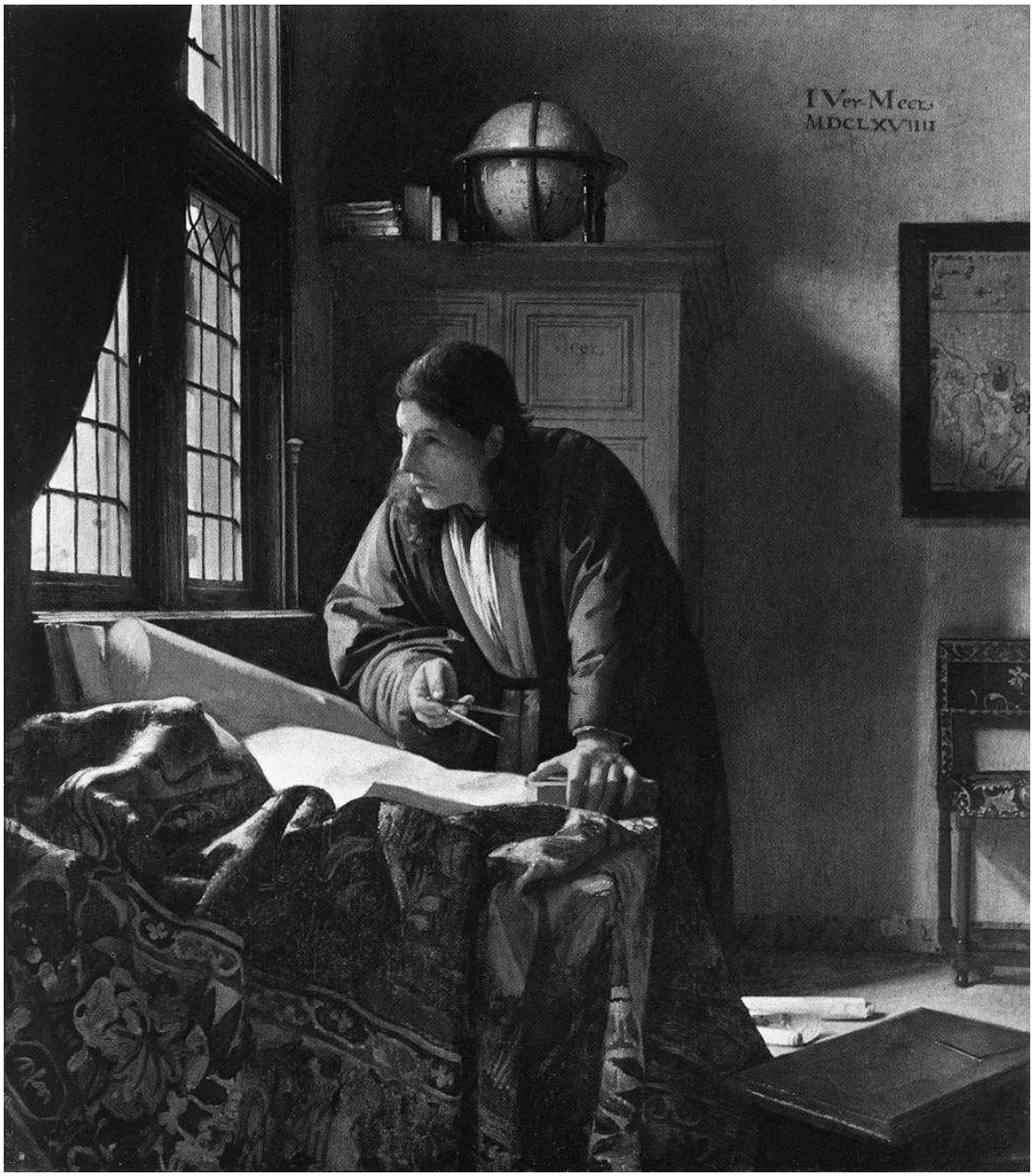
En même temps, la chrétienté se divise de l'intérieur avec la Réforme.

Éléments de chronologie

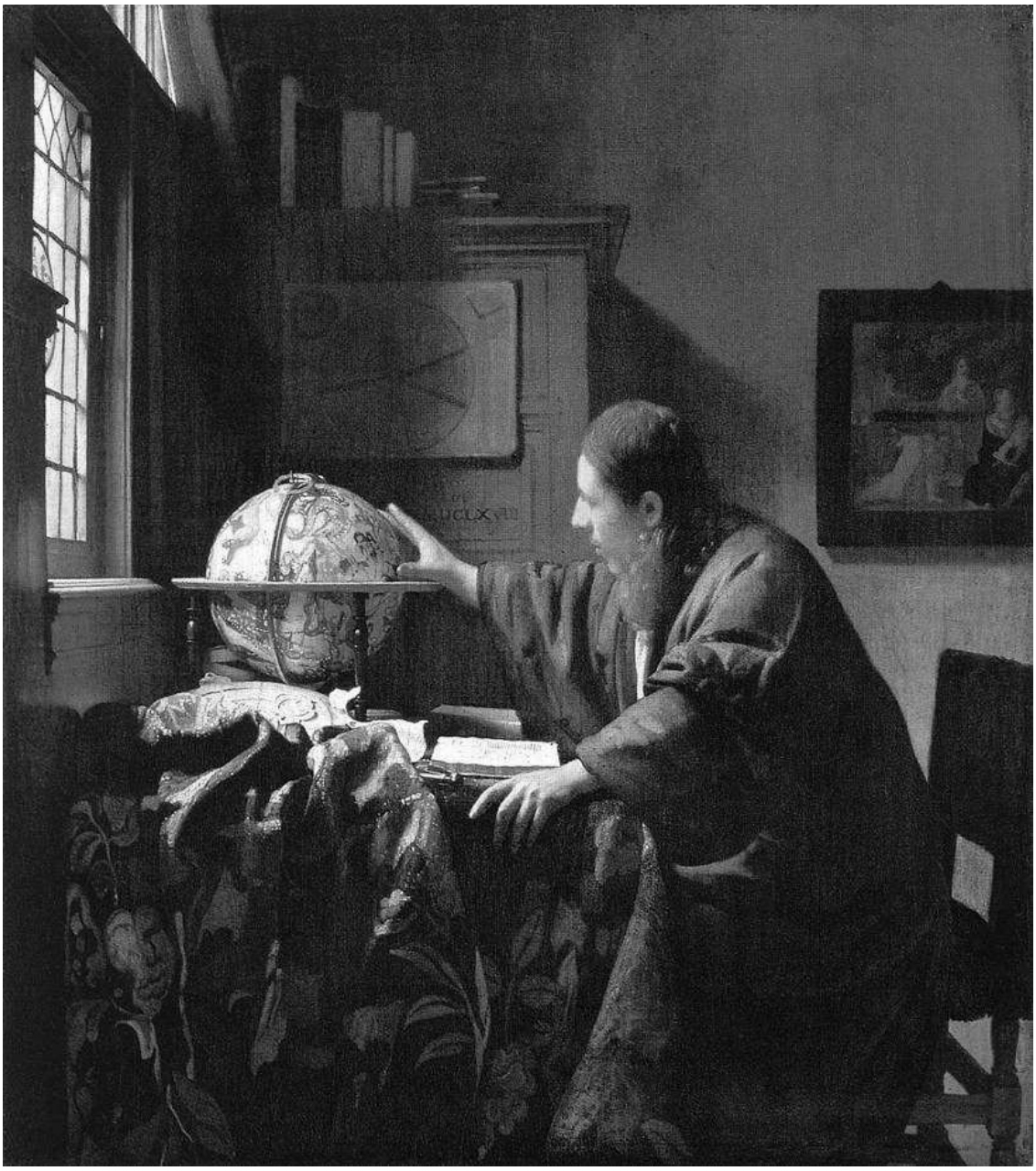
Chronologie	**Environ**
Prise de Constantinople - chute de l'empire byzantin	1453
Gutenberg et l'imprimerie (premier livre imprimé)	1456
Copernic	1473-1543
Christophe Colomb et le Nouveau Monde : remise en cause de Ptolémée.	**1492**
La Réforme, Luther et les 95 thèses	1517
Magellan et le tour du monde	1519-1522
Contre réforme : inquisition et index	1542-1543
***De Revolutionibus Orbitum Coelestium* (Copernic)**	**1543**
Tycho Brahe	1546-1601
Kepler	1571-1630
Giordano Bruno	1548-1600
Galilée	1564-1642
Révolution anglaise	1645-1649
Descartes	1596-1650
Giordano Bruno sur le bûcher	1600
La Nouvelle Astronomie (Kepler)	**1609**
Le Messager céleste (Galilée)	**1610**
Procès de Galilée	1633
Discours de la méthode de Descartes	1637
Newton	1643-1727
***Principia* de Newton (gravitation universelle)**	**1687**

À noter le lien permanent entre la géographie (découverte du Nouveau Monde) et l'astronomie (Révolution copernicienne). Ce lien est illustré par les deux œuvres de Jan Vermeer (1632-1675) :

Le Géographe


I Ver Meer
MDCLXVIIII

L’astronome



Copernic - 1473-1543

Copernic et le De Revolutionibus Orbitum Coelestium

Copernic est né à Thorn (aujourd'hui Torun en Pologne). Il est nommé chanoine d'Ermland (conseil d'Evèque) à 23 ans par son oncle qui était à la tête du diocèse d'Ermland. Il fit des études de droit canon et de médecine, alors très liée à l'astrologie. Il prescrit comme médecin des scarabées, de l'urine d'âne, des vers de terre et autres « médicaments » d'autant plus répugnants que la maladie était attribuée à la possession du malade par le Démon…

Copernic a fait très peu d'observations personnelles. Il fonda son œuvre sur les mesures d'autres astronomes et surtout sur l'Alamgeste de Ptolémée.

Le « De Revolutionibus Orbitum Coelestium » fut publié l'année de la mort de Copernic. D'après ses dires, Copernic en avait reporté l'édition « quatre fois neuf ans » (soit depuis 1507, Copernic ayant alors 34 ans).

Entre 1510 et 1514, Copernic a fait circuler un résumé manuscrit de ses idées.

Ayant eu connaissance de ce résumé, Rhéticus (1514-1574), fils d'un médecin brûlé comme sorcier en 1528 en raison de sa pratique de l'alchimie, cherche à persuader Copernic de faire connaître son œuvre au monde. Il fait éditer à Gdansk en 1540 un résumé des idées héliocentriques et finit par convaincre Copernic de publier.

Rhéticus devait suivre la publication à Nuremberg (ville luthérienne). Mais c'est finalement un prédicateur de la ville, Osiander, qui s'en chargea. Osiander était favorable aux idées de Copernic, mais lui conseilla la plus grande prudence. Osiander ajouta une préface à l'œuvre de Copernic, sans la signer, dans laquelle il écrivait « il n'est pas nécessaire que toutes ces hypothèses soient vraies, bien plus, pas même vraisemblables ».

Le système de Copernic : système héliocentrique

Soleil - Mercure - Vénus - Terre (Lune) - Mars - Jupiter - Saturne

Toutes les planètes gravitent en orbites circulaires autour du Soleil.

La Lune tourne autour de la Terre.

La Terre est dotée de 2 mouvements principaux : la rotation diurne responsable de l'alternance des jours et des nuits ; le mouvement orbital annuel qui donne l'alternance des saisons.

Le Soleil n'est pas exactement le centre du système, mais un point abstrait qui est le centre de l'orbite de la Terre. Copernic reprend ainsi la notion de « point équant » du système de Ptolémée pour l'appliquer au Soleil.

La terre est dotée d'un troisième mouvement, dit « en déclinaison », destiné à redresser l'axe de la Terre pour qu'il soit toujours orienté dans la direction de l'étoile polaire.

Critique de ce système

Maintient du mouvement circulaire : de la division sub - supra lunaire

Une des motivations principales de Copernic était, non de supprimer le géocentrisme, mais de supprimer le point équant en tant qu'il violait le principe du mouvement circulaire.

Il a affirmé d'emblée que toute supposition d'un mouvement non circulaire et non uniforme répugne à l'intelligence et doit être considérée comme indigne des corps célestes.

Un simple changement de repère

D'un certain point de vue, le système de Copernic n'est qu'un changement de repère (au sens géométrique) par rapport au système de Ptolémée.

La préface d'Osiander (dont on ne sait pas si Copernic l'avait voulu ou pas), le dogme du cercle, le maintient du point équant et l'ajout d'épicycles dans le système peuvent permettre de considérer les choses ainsi. D'autant plus que le système de Copernic, en maintenant le dogme du cercle, ne rend finalement pas beaucoup mieux compte des phénomènes que celui de Ptolémée.

La diffusion du système de Copernic

Au moment où Copernic fit circuler son manuscrit, la réception fut plutôt positive du fait de l'imprécision des tables astronomiques.

Copernic avait annoncé sur la page de titre de son œuvre, qu'il fournirait les tables astronomiques associées à son système. Mais il ne l'a jamais fait.

Les tables astronomiques (éphémérides)

Les tables astronomiques (ou éphémérides) donnent pour chaque jour de l'année la position calculée des corps célestes. À l'origine, les corps célestes sont les astres errants et les étoiles des constellations zodiacales.

Les tables astronomiques sont utilisées en navigation (les techniques pour déterminer la position d'un véhicule, la route parcourue, le cap à suivre).

Les tables de Ptolémée

L'Almageste fournissait non seulement une théorie du ciel, mais aussi des tables astronomiques.

Les tables arabes : Al-Khwarizmi (vers 780-850)

En 820, à Bagdad, le calife al-Mamûn crée un observatoire astronomique (la Maison de la Sagesse) et ordonne des travaux pour évaluer un degré de méridien, "mesurant la terre, par l'inspection du ciel ». La recherche des coordonnées géographiques de la Mecque faisait partie de ses motivations.

Mathématicien et astronome originaire du Khwarizm (vallée de l'Amou-Daria, fleuve à la frontière des actuels Turkménistan et Ouzbékistan qui se jette dans la mer d'Aral), Al-Khwarizmi (ou Khawarizmi, ou Khuwarizmi) travaille dans la Maison de la Sagesse sous le règne du Calife Al-Ma'mun (813 - 833) et occupe un poste d'astronome à l'observatoire de Bagdad.

En 825, il publie le « Kitâb al-jabr wa al-muqâbala», ce que l'on peut traduire par "le livre du rajout et de l'équilibre". Ce livre traitait de la résolution des équations.

Des traductions des livres d'Al-Khwarizmi n'apparaissent en Europe qu'au XIIème siècle, sous les titres significatifs de Dixit Algorizmi ("Al-Khwarizmi a dit que..."). Le « Kitâb al-jabr wa al-muqâbala» fut aussi traduit au XIIème siècle, et sous le titre d'Algèbre (Algebra en latin).

Grand connaisseur de l'Almageste de Ptolémée, il élabore, à partir de tables hindoues, un ensemble de **tables astronomiques : le Zif al-sindhind.**

Ces tables seront reprises pour la préparation des tables alphonsines.

Les tables alphonsines : 1 252

Les Tables alphonsines (1252), sont fondées sur la théorie de Ptolémée. Elles furent préparées sur commande du roi Alphonse X (roi de Castille et empereur germanique) et établies à partir de 1252. Elles s'inspiraient des tables arabes. Simples tableaux de chiffres, elles nécessitaient un mode d'emploi, ou Canons, qui fut rédigé par Jean de Saxe en 1327. L'ensemble a joui d'une très large diffusion jusqu'au milieu du XVIe siècle, l'astrologie étant alors jugée indispensable à la conduite des affaires publiques et privées aussi bien qu'aux traitements médicaux.

Elles furent l'ouvrage astronomique médiéval de référence jusqu'à leur remplacement par les tables pruténiques.

Les tables alphonsines

Les tables pruténiques : 1 551

Elles furent établies à partir de la théorie de Copernic par Erasme de Reinhold, à la demande du duc Albert de Prusse, pour remplacer les tables Alphonsines. Leur supériorité apparut clairement en août 1563 : elles n'avaient prévu qu'avec deux jours d'erreur la conjonction de Saturne et de Jupiter, alors que le décalage des tables alphonsines était d'un mois.

Les tables rudolphines : 1 627

Elles furent établies par Kepler à la demande de Rodolphe II. Elles sont fondées sur les observations de Tycho Brahé et le système de Kepler. Ce sont les premières tables basées sur un modèle exact du système solaire. De ce fait, ce sont aussi les dernières tables « archaïques ».

Les éphémérides : à partir de 1669

Avec la découverte du bon modèle astronomique et le développement des observatoires astronomiques, les premières publications régulières de tables vont apparaître. En 1669, Joachim d'Alencé (1640-1707) est à l'initiative de la publication d'un recueil annuel d'éphémérides nécessaires aux observateurs du ciel et aux navigateurs appelé : Connaissance des temps. En Angleterre, c'est en 1766 que sortira le Nautical Almanach et Astronomical Ephemeris.

Les calendriers

Les calendriers antiques

Babylonien : calendrier lunaire. 12 mois lunaires de 30 jours chacun auxquels sont ajoutés si nécessaire des mois supplémentaires pour conserver une correspondance avec les saisons de l'année.

Égyptien : calendrier solaire. Année solaire de 365 jours divisée en 12 mois de 30 jours chacun, à la fin desquels on ajoutait 5 jours.

Grec.

Le calendrier romain (ou calendrier julien)

C'est un calendrier solaire instauré par Jules César en 45 avant J.-C. Il avait pour but de remédier au décalage constaté entre les fêtes agricoles et les saisons. La dérive de l'ancien calendrier faisait qu'on célébrait les fêtes d'automne au printemps !

César fixa l'équinoxe de printemps au 25 mars. Il allongea l'année en cours de 90 jours ! Il créa l'année bissextile.

L'année julienne dure donc : 365 jours et 6 heures, contre 365 jours 5 heures 48 minutes et 46 secondes, soit un allongement de 11 minutes et 14 secondes par an (7,8 jours tous les 1000 ans).

Le calendrier grégorien

Une première réforme du calendrier julien fut envisagée au XVème siècle. Mais elle ne fut menée à bien qu'au XVIème siècle. Le calendrier faisait alors apparaître un retard de 10 jours par rapport à l'équinoxe de printemps.

Le 5 octobre 1582 fut décrété 15 octobre 1582. L'équinoxe de printemps fut fixé au 21 mars (parce que l'équinoxe de printemps du Concile de Nicée en 325 avait eu lieu en réalité le 21 mars : 25 mars - 7,8 * (325+45) = 22,114 …)

L'année bissextile fut modifiée : on déclara année bissextile les années divisibles par 4 à l'exception des années multiples de 100 qui ne sont divisibles par 400 (1900 n'est pas bissextile, 2000 est bissextile).

Les autres calendriers

Juif, orthodoxe, protestant, musulman, chinois, aztèque, maya, révolutionnaire (1793-1806)…

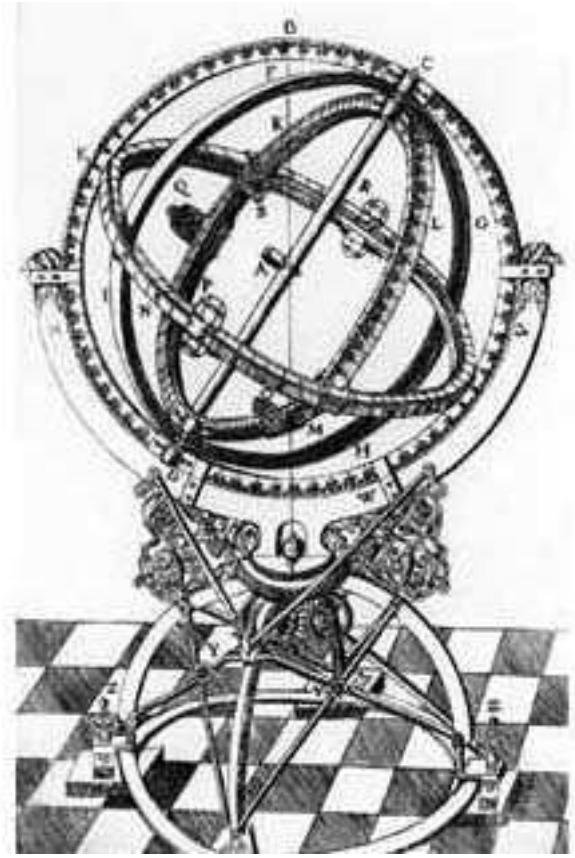
Brahé - 1546-1601

Un grand observateur

Tycho Brahé fut le plus grand observateur du ciel à l'œil nu, mais aussi presque le dernier.

Grande précision : il mesure la position des étoiles en minutes, quand ses prédécesseurs arrivaient au mieux à un demi-degré d'angle (30 minutes) de précision.

Il utilisait des instruments de sa fabrication : astrolabe, sphère armillaire, etc.



L'astrolabe de Tycho Brahé

L'astrolabe est un instrument qui permet de mesurer la hauteur des astres au-dessus de l'horizon.

Un astrolabe est constitué d'un cercle ou d'un arc de cercle gradué en degrés d'arc, avec en son centre un bras mobile articulé. Après avoir aligné le point zéro du cercle sur l'horizon, on déplace le bras de l'astrolabe pour viser l'astre considéré, sa hauteur (ou azimut) se lisant sur le cadran en regard.

Il peut aussi se composer d'autres cercles, que l'on peut tourner les uns par rapport aux autres. Ce sont les grands cercles de référence de la sphère céleste (équateur, écliptique, méridien, horizon…) : c'est alors une sphère armillaire.

La Nova de Tycho Brahé, 1572

Le 11 novembre 1572, Tycho Brahé observe un nouveau point lumineux dans le ciel.

- Cet objet céleste n'a pas de parallaxe : c'est donc une étoile, une « nouvelle (nova) étoile ».
- Cette observation contredit le dogme de la perfection du monde supralunaire.
- Cette apparition dura jusqu'en mars 1574, élément supplémentaire pour remettre en cause la perfection du monde supralunaire.

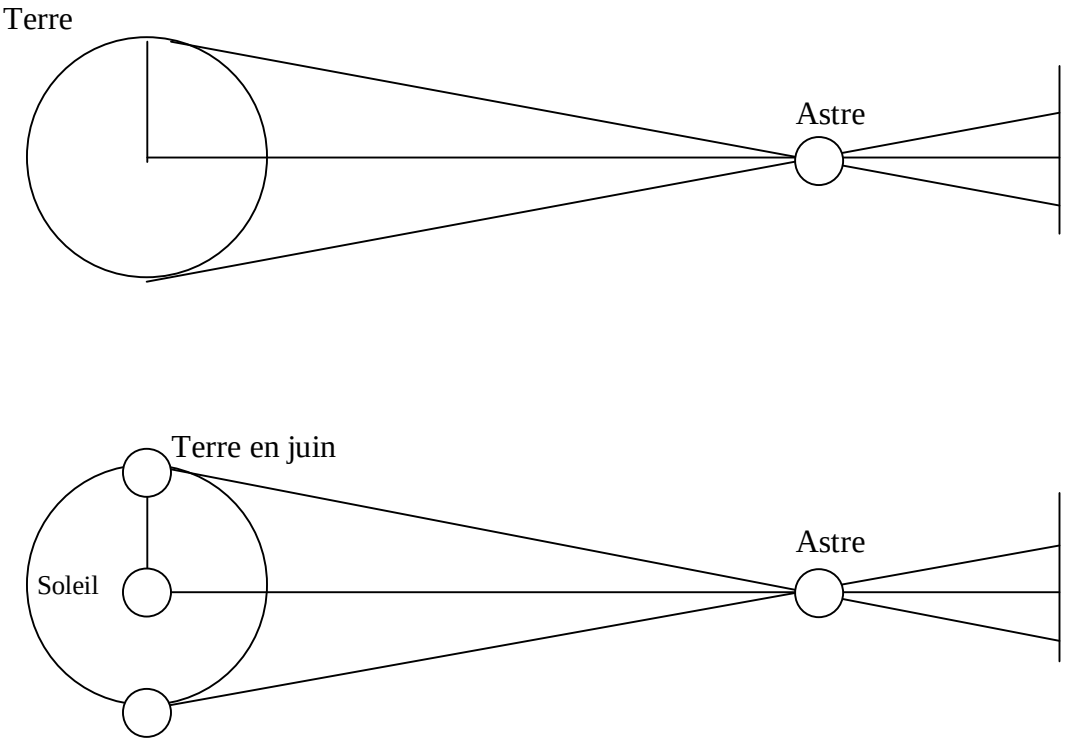
En 1573, Brahé publie un opuscule nommé : « De Nova Stella ».

Le phénomène observé par Brahé était une Supernova. Cette supernova est appelée depuis « Nova de Tycho Brahé ».

La parallaxe

La parallaxe d'un astre est l'angle sous lequel on verrait, de cet astre, le rayon de l'orbite terrestre.

La parallaxe peut se mesurer en se plaçant au même moment à deux endroits différents de la Terre (deux endroits opposés par exemple) ou bien se mesurer à deux endroits différents de l'orbite terrestre (deux endroits opposés par exemple, c'est-à-dire deux moments différents dans le temps).



Novas et supernovas

Une nova est une phase de l'évolution de certaines étoiles dont l'éclat augmente fortement et de façon soudaine. Quand le phénomène est particulièrement violent, on parle de supernova.

L'astronomie contemporaine considère que le phénomène de nova ou de supernova est assez courant dans le ciel, mais pas toujours facile à observer.

Plusieurs novas ont été observées dans le passé. La plus ancienne remonte à Hipparque, mais c'est un témoignage incertain. Les seuls témoignages vraiment sûrs antérieurs à Brahé viennent des Chinois, depuis 183 jusqu'en 1181.

D'après ce que nous disent les chroniques chinoises, la nova de 183 devait être visible à Alexandrie. On ne s'explique pas la raison pour laquelle les astronomes de l'empire romain ne l'ont pas répertorié. On peut avancer comme raison :

- La peur de remettre en cause Ptolémée, mort 15 années auparavant (en 168)

- La crainte de l'empereur Commode (180-192), l'un des tyrans les plus sanguinaires de l'histoire.

L'observatoire d'Uraniborg

Frédéric II (roi de Danemark et de Norvège) concéda en 1575 à Brahé l'île de Hveen pour y construire un observatoire : le château d'Uraniborg. Brahé y travailla de 1576 à 1597. Cet observatoire était équipé des instruments les plus précis de l'époque.

Brahé fut le premier à suivre les « planètes » et les étoiles de façon continue, jour après jour.

Dès le début de son séjour, il répertoria rapidement 777 étoiles avec précision. Puis en ajouta 300, médiocrement repérées, pour égaler le nombre d'étoiles du catalogue de Ptolémée.

http://www.astrofiles.net/article23.html

La qualité des observations de Brahé est fondamentale pour le développement des lois de Kepler et à partir de là, de la loi de la gravitation.

La comète de 1577 : confirmation de la corruptibilité du ciel

Brahé découvrit une comète en 1577 et surtout, la situa bien au-delà du monde sublunaire.

Cette observation confirma la corruptibilité du ciel, après la nova de 1572.

De plus, la comète n'était pas dotée d'un mouvement circulaire : ce qui détruisit la notion d'orbe : ces sphères solides et transparentes sur lesquelles les astres étaient censés être fixés depuis Aristote.

Le système géo-héliocentrique de 1583

Brahé proposa un système dit « géo-héliocentrique » : toutes les planètes tournent autour d'un Soleil qui tourne autour de la Terre. La Terre est aussi immobile et au centre du Monde. La lune tourne autour de la Terre.

Ce système, qui rappelle celui d'Héraclide du Pont, permettait de rendre compte des phénomènes, tout en conservant les dogmes principaux : mouvement circulaire et Terre centrale.

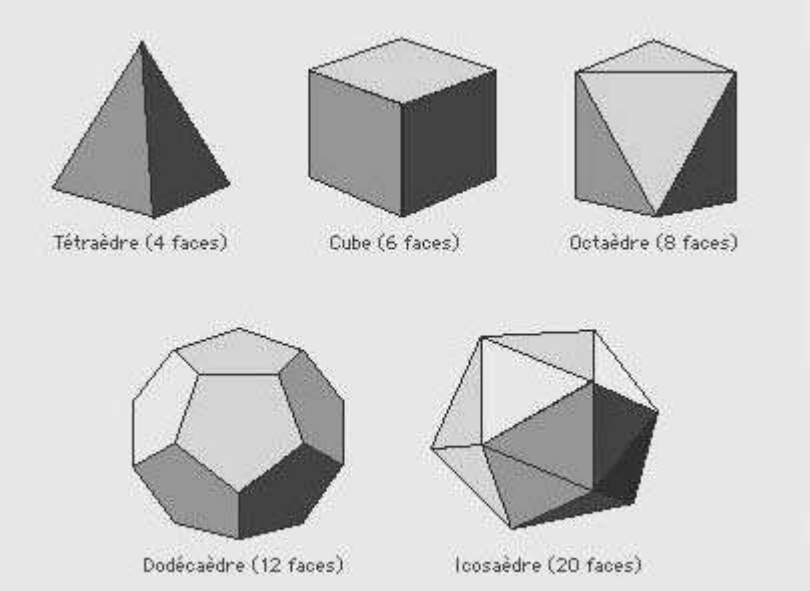
Kepler - 1571-1630

Kepler est une personnalité contrastée : à la fois premier grand scientifique moderne et grand mystique.

Kepler mystique : Mysterium Cosmographicum, 1595

En 1595, Kepler écrit « Mysterium Cosmographicum » traduit par « Le secret du Monde », livre dans lequel il expose sa fascination pythagoricienne du nombre. Il élabore une théorie des polyèdres emboîtés dont le but était de dévoiler le plan selon lequel le Créateur avait bâti l'univers.

Il existe 5 polyèdres réguliers : le tétraèdre (4 faces triangulaires), le cube (6 faces carrées), l'octaèdre (8 faces triangulaires), le dodécaèdre (12 faces pentagonales) et l'icosaèdre (20 faces triangulaires).



Les 5 polyèdres réguliers

Kepler est un copernicien. Pour lui l'orbite circulaire de Mercure se trouve inscrite dans un premier polyèdre, lui-même inscrit dans une seconde sphère qui définit l'orbite de Vénus. Cette orbite est inscrite dans un second polyèdre lui-même inscrit dans une troisième sphère qui définit l'orbite de la Terre. Le dernier polyèdre est inscrit dans une sphère qui définit l'orbite de Saturne.

C'est le principe de l'harmonie des sphères.

Reste à connaître l'ordre de succession des polyèdres. Ainsi, avec la mesure d'une seule distance, on aurait la taille de l'Univers : le secret du Monde !

Kepler essaya par tous les moyens de faire rentrer les données des tables pruténiques dans son agencement de polyèdres. N'y arrivant pas, il attribua une certaine épaisseur aux sphères orbitales. N'y arrivant toujours pas, il accusa les données d'être fausses et de ne pas avoir été corrigées depuis Ptolémée !

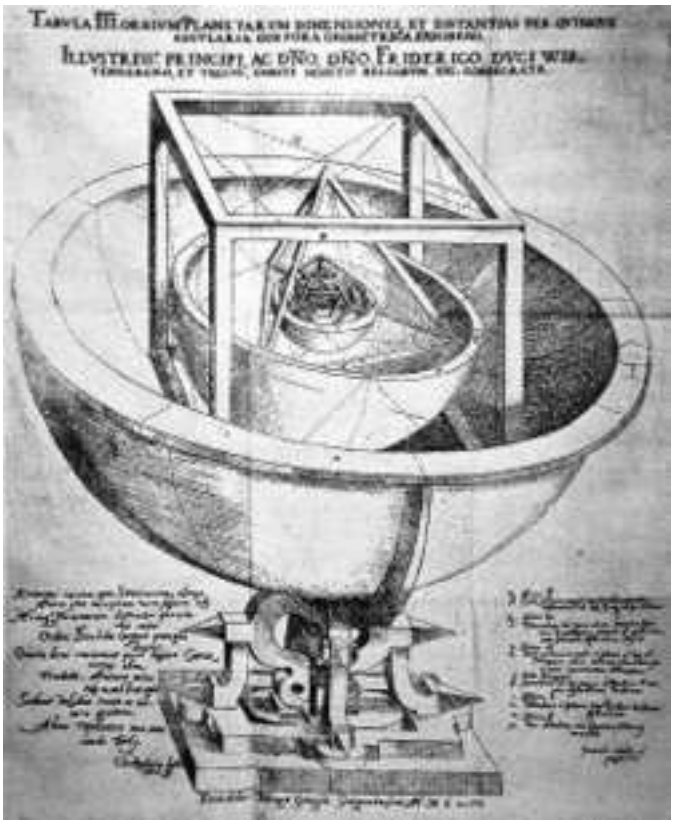


Planche III montrant les dimensions et les distances des orbes des planètes au moyen des cinq corps réguliers de la géométrie.

La sphère externe est celle de Saturne. La sphère dans le cube est celle de Jupiter. Etc.

La rencontre Kepler - Brahé : 1599-1601

En 1599, Kepler travailla avec Brahé jusqu'à la mort de ce dernier en 1601.

Les deux hommes, très différents de caractère (Brahé aimait les festins tandis que Kepler était un bourreau de travail : un empiriste et un théoricien !), étaient condamnés à s'entendre : Tycho était le seul à posséder les mesures dont Kepler avait besoin pour prouver son système, et Kepler était le seul à être capable de transformer les mesures de Brahé en preuve de son système. Bref, chacun roule pour son système, et roule son collègue !

Kepler travailla à l'élaboration d'une théorie des mouvements de Mars. En effet, son excentricité importante avait toujours posé des problèmes insolubles aux astronomes. C'est ce travail, nourri par les données d'observation de Brahé, qui sera à l'origine des lois de Kepler.

Epigramme au sujet des mouvements de Mars

Uranie à Kepler :

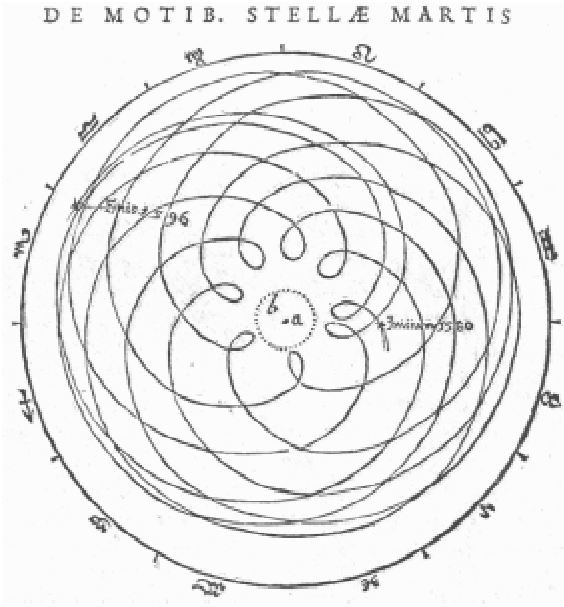
« Cesse, ô Kepler, de combattre contre Mars :

Mars ne se soumet à personne, si ce n'est à lui-même.

En vain donc tu tentes la tâche de le mettre dans les chaînes :

Lui qui est resté libre pendant des siècles innombrables. »

Kepler, Astronomie nouvelle, 1609



L'orbite de Mars vue dans le référentiel géocentrique.

Schémas de Kepler de 1580 à 1596.

La Terre est au centre, le soleil orbite sur le cercle en pointillés.

1609 - L'Astronomie nouvelle : les lois de Kepler : la fin d'Aristote !

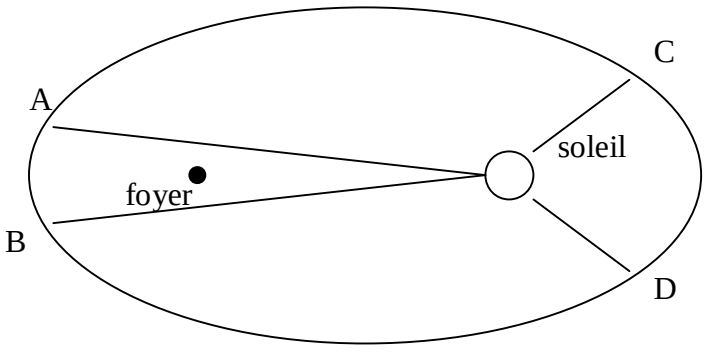
Après la mort de Brahé, Kepler obtint une rente de Rodolphe II de Habsbourg, roi de Hongrie et de Bohème, qui avait déjà accueilli Tycho Brahé après son départ d'Uraniborg. Kepler pu s'approprier toutes les observations de Brahé.

En 1604, il publie les « Compléments à Vittelion » concernant l'optique.

EN 1609, il publie « L'Astronomie nouvelle », ouvrage dans lequel on trouve les deux premières lois de Kepler :

1ère loi de Kepler : l'orbite des planètes est une **ellipse**, dont l'un des foyers est le Soleil

2ème loi de Kepler : les planètes n'ont **pas un mouvement uniforme** : en s'approchant du Soleil, les planètes accélèrent leur marche sur leur orbite, et la ralentissent lorsqu'elles s'en éloignent. La droite joignant le Soleil et la planète balaye dans sa course des aires égales en des temps égaux.



Loi de Kepler : si les durées AB et CD sont égales, les surfaces AB-Soleil et CD-Soleil sont égales.

À noter que l'excentricité des orbites des planètes du système solaire est proche de 0, ce qui veut dire que l'ellipse est proche d'un cercle.

Ces lois signifient :

- la fin du géocentrisme ;
- la fin du mouvement circulaire ;
- la fin du mouvement uniforme.

Cela signifie donc la fin des trois dogmes fondamentaux de l'astronomie depuis Aristote. La conséquence immédiate est la fin de la distinction entre le monde sublunaire et le monde supralunaire, distinction qui finira d'être contredite par la publication l'année suivante, en 1610, du messager céleste.

C'est grâce aux observations et aux mesures de Brahé, et grâce à la foi que Kepler avait dans la précision de ces mesures, que Kepler a pu concevoir une orbite non circulaire pour Mars. Sans cette foi dans la qualité des mesures, Kepler aurait tout simplement modifié la valeur des mesures pour les faire rentrer dans un système circulaire.

Dans son livre, Kepler raconte tout son cheminement intellectuel. Il écrit :

> *Qui es-tu, Kepler, pour bouleverser les croyances des astronomes depuis le début des temps ?! Qui es-tu pour rejeter le mouvement circulaire des planètes ?*

L'acceptation de ces lois et de leur signification fut difficile pour Kepler lui-même.

La réception de l'astronomie nouvelle

L'ouvrage de Kepler fut pratiquement ignoré de ses contemporains !

C'était un ouvrage dense, mal construit, faisant état tant des résultats finaux que des fausses pistes !

Il écrivit d'ailleurs :

> *Moi-même, mathématicien […] en relisant mon ouvrage […] je me fatigue des démonstrations que j'avais moi-même introduites auparavant.*
>
> *Kepler, Harmonie du Monde*

1618 - L'Harmonie du Monde et la troisième loi de Kepler

Après avoir découvert ses deux lois, Kepler revient à ses conceptions pythagoriciennes.

« L'Harmonie du Monde » est un ouvrage qui se voulait une synthèse de toute la connaissance humaine : de la géométrie à la musique, de l'astrologie à l'astronomie. Kepler y recherchait la musique des astres dont Pythagore parlait.

C'est dans ce texte que Kepler va produire sa troisième loi :

> **3ème loi de Kepler :** pour toutes les planètes, le rapport du carré du temps de révolution de la planète autour du Soleil et du cube du demi-grand axe de son orbite (distance moyenne au Soleil) est le même.

Cette loi établit une dépendance mathématique entre la période de révolution et la distance au Soleil. Elle permettra le calcul de la distance Terre-Soleil et toutes les distances entre les astres

du système solaire. **Kepler a ainsi fini par trouver le secret qu'il cherchait : celui de la taille de l'Univers !**

Cette troisième loi a permis d'établir que la distance du Soleil à Saturne (la planète connue la plus éloignée) est dix fois plus grande que celle du Soleil à la Terre.

Méthode :

	Période	Période carré	Distance	Distance cube
Terre	1	1	1	1
Sature	29,46	867,8916	9,94	982,107784
Mars	1,88	3,5344	1,52	3,511808

La formule de la troisième loi de Kepler, c'est :

$$\mathbf{P(Terre)^2/R(Terre)^3 = P(Saturne)^2/R(Saturne)^3}$$

On peut connaître la durée des révolutions par observation.

Du coup, on peut connaître la distance relative de toutes les planètes au soleil : 9,94 pour Saturne, 1,52 pour Mars.

Il ne reste plus, pour connaître la taille de l'univers, qu'à connaître une distance particulière, la distance Terre-Soleil par exemple, ou encore la distance Terre-Mars. En effet, lors d'une opposition martienne - quand le Soleil, la Terre et Mars sont alignés dans cet ordre - la distance Terre - Mars vaut environ la moitié de la distance Terre - Soleil. Il suffira donc de mesurer cette distance pour connaître toutes les distances du système solaire, et avoir percé le « secret du monde » de Kepler !

Les tables rudolphines : 1 627

Elles furent établies par Kepler à la demande de Rodolphe II. Elles sont fondées sur les observations de Tycho Brahé et le système de Kepler. Elles ne furent publiées qu'en 1627. Publiés en pleine guerre de 30 ans, elles n'intéressaient plus grand monde.

Preuves du système de Kepler : Mercure et de Vénus devant le Soleil, le mouvement de la lune

Le modèle de Kepler permettait pour la première fois de prédire le passage des planètes intérieures, Mercure et Vénus, devant le Soleil. Ainsi, Kepler prédit le passage de Mercure du 7 novembre 1631 et le passage de Vénus du 7 décembre 1631. Mort en 1630, il ne put les observer.

Gassendi et Mercure : 1631

Pierre Gassendi (1592-1655), philosophe, mathématicien et scientifique, dont la devise était « Sapere Aude » (« Ose connaître », devise dont Kant fera celle des Lumières en la reformulant : « aie le courage de te servir de ton propre entendement »), observera le passage de Mercure :

> *Le rusé Mercure voulait passer sans être aperçu, il était entré plutôt qu'on ne s'y attendait, mais il n'a pu s'échapper sans être découvert, je l'ai trouvé et je l'ai vu; ce qui n'était arrivé à personne avant moi, le 7 novembre 1631, le matin.*

Ce passage fut également observé par trois autres personnes Remus Quietanus à Rouffach (Haut-Rhin), le père Cysatus à Innsbrusck (Tyrol) et un jésuite anonyme à Ingolstadt (Bavière).

Tous furent surpris par la petitesse du diamètre apparent de Mercure car tous, imaginant l'univers assez petit, imaginait ce diamètre apparent plus grand.

Horrocks et Vénus : 1639

Pour le passage de Vénus, les calculs de Kepler se révélèrent erroné d'une demi-journée. Le phénomène ne fut donc pas visible d'Europe.

Le pasteur anglais Jeremiah Horrocks (1619-1641) prédit le passage suivant de Vénus pour le dimanche 4 décembre 1639 à 3 h p.m. (24 novembre 1639 du calendrier julien). Il observa ce passage depuis son village de Hoole (près de Preston) en projetant l'image du Soleil sur un papier gradué et réalisa ainsi la première mesure d'un passage de Vénus devant le Soleil.

Horrocks fit des mesures qui servirent à estimer la distance Soleil-Terre.

Ce passage fut également observé à Manchester par William Crabtree (1610 - 1644), un ami de Horrocks.

Comme les observateurs de Mercure, Horrocks fut surpris par la petitesse de Vénus. Ceci devait le conduire à reprendre les idées de Kepler et à imaginer une force invisible maintenant le Système solaire en équilibre.

Horrocks et la Lune : 1637

Horrocks, aidé de Crabtree et de William Gascoigne (1612-1644), montra en 1637 que le mouvement de la Lune obéit aux lois de Kepler.

La fin de Kepler : 1 630

Kepler est mort loin de chez lui et désargenté. Bien que fervent catholique, on lui refusa les derniers sacrements, au motif qu'il n'avait pas accepté, quelques années auparavant, de condamner les calvinistes. Le grand fondateur de l'astronomie moderne fut enterré sans cérémonie.

Bruno - 1548-1600

Bruno est le premier copernicien italien. C'est un mystique qui va très au-delà de son maître.

Ce n'est ni un astronome, ni un mathématicien, ni un physicien. Docteur en théologie, il quitte précipitamment l'ordre en 1576 pour éviter deux procès religieux. C'est un philosophe qui mènera une existence faite de persécutions et qui sera rapidement condamné pour hérésie.

Pour Bruno, Dieu, dans sa toute-puissance, a créé un monde infini : une infinité de mondes semblables au nôtre, perdus dans l'infinité de l'espace, tournant autour d'autres soleils, habités par d'autres humanités. Dans cet espace infini, il n'y a plus de lieu privilégié, donc plus de centre : ni la Terre, ni le Soleil ne sont au centre de l'univers.

Pour Bruno, si Dieu est infini et l'Univers aussi, alors Dieu et l'Univers sont une seule et même chose. La pensée de Bruno est une sorte de panthéisme (Dieu est tout et tout est Dieu).

Bruno rejette l'objection d'Aristote contre la mobilité de la Terre (la pierre qui tombe verticalement) en exprimant intuitivement le principe d'inertie :

> *Ainsi se meut avec la Terre tout ce qui se trouve sur la Terre […] Un homme placé sur le mât du navire, quelle que soit la vitesse de celui-ci, ne manquera pas le but ; rien n'empêchera la pierre ou tout autre objet pesant jeté [du sommet du mât d'atteindre] en ligne droite la base du mât.*

Cependant, la pensée de Bruno n'a guère eu d'influence sur la nouvelle science en train de naître. Il s'opposait même plutôt à l'esprit de celle-ci, n'attendant rien de l'expérience (confuse, toujours finie et donc fermée à l'infini, souvent fausse), ni rien des mathématiques.

Bruno est dénoncé à l'Inquisition en 1592 et condamné pour hérésie. Il sera brûlé vif à Rome le 17 février 1600.

Remarques sur les précurseurs

Les théories de Copernic et Bruno, même si elles sont justes, ne sont pas réellement scientifiques : elles ne sont fondées sur aucunes observations ou expérimentations nouvelles. Le système de Copernic rend à peine mieux compte des phénomènes que le système de Ptolémée. Le système de Bruno est une pure spéculation.

Par contre, les observations de Tycho Brahé sont un précieux apport à la connaissance scientifique, que ce soient celles des étoiles, celles des planètes, celles de la supernova ou celles de la comète. Son système théorique est certes faux, mais, du point de vue scientifique, il est modeste et réaliste. Enfin, le système de Kepler, parce qu'il est fondé sur les observations de Tycho Brahé, rend cette fois réellement mieux compte des phénomènes que tous les systèmes précédents. C'est lui qui atteint le réel tel que nous le connaissons encore aujourd'hui.

Galilée - 1564-1642

Né à Pise, Galilée y fut nommé professeur de mathématique en 1589. En 1592, il s'installe à Padoue où le Sénat de Venise lui avait proposé une chaire.

C'est un nouveau Christophe Colomb : le découvreur d'un nouveau monde : celui des quatre lunes de Jupiter et des centaines de nouvelles étoiles invisibles à l'œil nu.

Ceux qui le côtoyèrent décrivirent un personnage méprisant et sûr de lui, aisément insultant : « bouffons », « pygmée intellectuel » faisait partie de son vocabulaire pour qualifier ses adversaires.

En physique, une de ses gloires fut de donner l'expression mathématique de la loi de la chute des corps.

Le nouveau Colomb : Le Messager céleste : 1610

La lunette de Galilée : 1609

Depuis le XIIIème siècle, les hommes connaissaient les lentilles et savaient que l'on peut grossir l'image des objets.

L'objet appelé « lunette de Galilée » ne fut pas inventé par lui, mais perfectionné par lui. D'une part, elle évitait les déformations et les irisations, d'autre part elle grossissait plus.

À la fin de l'année 1609, il possédait une lunette qui permettait de grossir 30 fois.

Galilée prétendit avoir réinventé la lunette. Mais il n'a jamais publié de théorie de cet instrument. Kepler avait écrit en 1604 un premier livre fondateur de l'optique, les « Compléments à Vitelion ». En 1611, la « Dioptrice » de Kepler toujours, expliquera la lunette de Galilée avec les lois de son ouvrage de 1604.

Le Messager céleste : 1610

Dans « Le Messager céleste », petit livre de 56 pages, Galilée apprend au monde que

- il y a des irrégularités sur la Lune
- il existe plusieurs centaines d'étoiles invisibles à l'œil nu
- Jupiter possède 4 lunes

Avant même que la polémique ne retombe, Galilée récidive en découvrant :

- Les tâches du Soleil
- Les phases de Vénus (donc Vénus tourne autour du Soleil)
- La forme étrange de Saturne

Toutes ces découvertes mettent en cause :

- la complétude de la théorie aristotélicienne (il existe des planètes et des étoiles en plus)
- la perfection du monde supralunaire (irrégularité de la Lune, tâches du Soleil)
- le système géocentrique :
  1. Les phases de Vénus s'expliquent par le fait que Vénus tourne autour du Soleil.
  2. Les satellites de Jupiter faisaient de Jupiter un deuxième centre. Or Aristote lui-même admettait que s'il devait exister plus d'un centre, il devrait en exister une infinité.

3. Un des arguments contre le mouvement de la Terre autour du Soleil, était qu'au quel cas, la Terre perdrait son satellite en cours de route ! Les satellites de Jupiter venaient prouver qu'il était possible de tourner autour d'un autre astre (la Terre pour les aristotéliciens) sans perdre ses satellites.

Réception des découvertes de Galilée : le rôle de Kepler

Kepler soutint immédiatement Galilée, qui n'avait jamais rien dit sur la « Nouvelle astronomie » et ne l'avait probablement pas lu.

En le soutenant, il lui retira la paternité de la lunette, tout en écrivant :

> *Je sais combien il y a de différence entre les conjectures théoriques et l'expérience de l'observation, entre la discussion de Ptolémée sur les Antipodes et la découverte du Nouveau Monde par Colomb, et plus encore entre* ces *tubes à deux lentilles communément répandus et ton appareil, Galilée, grâce auquel tu as percé le ciel même.*

Mais Kepler ne profita pas de l'occasion pour présenter les résultats de sa Nouvelle Astronomie…

En avril 1610, Galilée n'était soutenu que par Kepler. Mais c'était la voix la plus puissante d'Europe, car Kepler passait sans conteste pour le premier astronome d'Europe.

Galilée pourtant, malgré les demandes pressantes de Kepler, refusait de lui fournir une lunette, sous prétexte de leur prix de revient. En fait, il en faisait cadeau aux puissants, en évitant d'en fournir à des astronomes, car il craignait des découvertes susceptibles de ternir les siennes.

Kepler finit par disposer d'une lunette, prêtée par l'électeur de Cologne. Du 3 août au 9 septembre 1610, Kepler invita d'autres astronomes à une séance de vérification : tous les résultats concordaient : les satellites existaient bel et bien.

Après cette reconnaissance, ce fut le triomphe pour Galilée qui fut reçu par le Pape en 1611.

De son côté, après avoir utilisé la lunette de Galilée, Kepler fonda la dioptrique, science nouvelle qui étudie la lumière réfractée.

Remarque : le mot « satellite » a été forgé par Kepler dans une lettre à Galilée.

L'affaire de 1616

Au début de l'année 1616, l'Eglise mis les ouvrages coperniciens à l'Index.

Le pape ordonna alors que l'Inquisition convoque Galilée pour qu'il renonce à ses idées hérétiques.

Galilée fut sommé d'abandonner entièrement ses idées coperniciennes, de ne pas les enseigner et de n'en faire aucun exposé, ni écrit, ni oral. Le procès-verbal dit que Galilée acquiesça et qu'il sortit libre des lieux.

La preuve selon Galilée

En 1615, dans une lettre à la Grande-duchesse Christine, Galilée écrit :

« Les conclusions naturelles, véridiquement démontrées, ne doivent pas céder le pas au passage de l'Ecriture… Il faut avant de condamner une proposition naturelle, montrer qu'elle n'a pas été démontrée nécessairement ; et ceci n'est pas à ceux qui la tiennent pour vraie de la faire, mais à ceux qui l'estiment fausse. »

Le principe avancé ici par Galilée repose sur :

- Les propositions naturelles (données par l'évidence sensible, par opposition aux propositions surnaturelles)
- La démonstration.

C’est la base de la preuve moderne.

Galilée considère donc que c’est à l’Eglise de prouver qu’il a tort sur la base du principe avancé et non pas sur la base d’une argumentation dogmatique. Un tel point de vue conduit à soumettre la Révélation à la raison naturelle, et non pas le contraire (ce qui, dans le cas de dogmes comme ceux de l’immaculée conception, la résurrection, etc., risque d’être mortel pour la religion).

La preuve selon Bellarmin

Le cardinal Bellarmin écrit :

> *« Il me semble que Votre Révérence [un religieux partisan de Copernic] et M. Galilée agissez prudemment en vous contentant de parler hypothétiquement […] de même que Copernic à ce que j’ai toujours compris. […] Vouloir affirmer absolument que le Soleil est au centre de l’Univers et tourne seulement sur son axe sans se déplacer de l’est à l’ouest, est une attitude très dangereuse qui est destinée non seulement à irriter les philosophes scolastiques et les théologiens, mais aussi à porter atteinte à la sainte foi, en contredisant l’Ecriture […] Le Concile de Trente a interdit que l’on interprétât l’Ecriture dans un sens contraire à l’opinion courante des Pères. […] S’il y avait une véritable preuve que le Soleil est au centre de l’Univers, que la Terre est le troisième ciel, et que le Soleil ne tourne pas autour de la Terre, mais la Terre autour du Soleil, alors il faudrait entreprendre avec une grande circonspection d’expliquer les passages de l’Ecriture qui paraissent enseigner le contraire, et admettre que nous ne les comprenons pas, plutôt que de déclarer fausse une opinion qui est prouvée vraie. »*

Arguments et erreurs de Galilée

- **La théorie des marées**

Prouver une théorie : constater qu’elle explique des phénomènes jusqu’alors mal expliqués.

Avant l’année 1616, Galilée avait tenté de prouver la validité système de Copernic en s’adressant directement au pape, par une théorie des marées. Cependant, cette théorie était fausse et on pouvait aisément en montrer les incohérences.

Le principe de la théorie des marées de Galilée était que la nuit, les eaux sont soumises à deux forces qui s’ajoutent (la force de la rotation de la Terre autour du Soleil et la force de la rotation de la Terre sur elle-même), tandis que le jour, ces deux forces étaient opposées. C’est ce différentiel de forces qui devait expliquer les marées et donc venir confirmer le système copernicien.

Le défaut de cette théorie est qu’elle ne pouvait expliquer qu’une marée par jour, à midi, alors qu’on en observe deux à des heures variables.

Une fois de plus, Galilée n’avait pas soutenu les théories de Kepler qui envisageait clairement l’influence de la Lune sur les marées.

- **Le dogme du cercle et le rejet du système de Kepler**

Prouver une théorie : constater qu’elle rend mieux compte des phénomènes que la théorie précédente.

Le système de Copernic ne rendant pas beaucoup mieux compte des observations n'était pas plus prouvable que celui d'Aristote. On a déjà vu qu'avec des cercles, des épicycles et des points équants, on peut rendre compte de n'importe quel mouvement.

Le bon système était celui de Kepler, mais Galilée n'en n'a jamais fait mention !

Galilée est resté dogmatiquement attaché au mouvement circulaire.

Ce sont les tables rudolphines qui donneront une vérification expérimentale du système de Kepler. Mais Galilée ne s'y est jamais intéressé.

- **Le dogme du cercle et le rejet des comètes**

Des comètes furent observées en 1618 par le père Grassi, un Jésuite. Il tira les mêmes conclusions que Tycho Brahé, à savoir que les comètes n'ayant pas de parallaxe mesurable, ces corps devaient appartenir au monde supralunaire (et non pas être des phénomènes atmosphériques comme on le croyait). De plus, Grassi soutenait que leur trajectoire n'était pas circulaire.

Galilée répondit à Grassi dans un livre : l'Essayeur, dans lequel il rejeta les conceptions de Grassi en le ridiculisant avec beaucoup d'arrogance et en allant jusqu'à nier l'existence des comètes !

Dans l'Essayeur, Galilée écrit la fameuse phrase :

> *« **L'univers est écrit dans la langue mathématique**, et ses caractères, ce sont des triangles, des cercles et autres figures géométriques sans le moyen desquels il est humainement impossible d'en comprendre un mot »*

On voit que cette phrase est à la fois moderne (l'univers écrit en langue mathématique) et à la fois un argument en faveur du dogme du cercle.

Résultats du procès

Le livre de Copernic sera mis à l'Index.

Kepler écrira :

« Certains, par leur comportement imprudent, sont arrivés à ce résultat que la lecture de l'œuvre de Copernic, qui avait été absolument libre pendant quatre-vingts ans, est maintenant interdite. »

La question de la preuve : y a-t-il de la vie extra-terrestre ?

Il n'y en a pas : je le prouve en disant : on n'en a jamais trouvé.

Il y en a : je le prouve en disant : ***statistiquement***, il y a tellement de planètes, qu'il doit y en avoir une comme la notre.

Il n'y a pas de vie extraterrestre, c'est un fait, jusqu'à preuve du contraire.

Il y a ***probablement*** de la vie extraterrestre, c'est une hypothèse.

Le « probablement » laisse une ouverture au fait qu'il n'y en ait pas. Celui qui cherche de la vie extraterrestre y croit !

Quand Galilée a trouvé les satellites de Jupiter, il n'a pas eu besoin d'y croire a priori. Quand X a trouvé Pluton, il la cherchait comme une solution à un problème expérimental (l'observation de mouvements non prévus par la théorie). L'existence de Pluton était une hypothèse qui venait confirmer un ensemble d'observations et de calculs à partir d'une théorie.

Par contre, l'existence de vie extraterrestre ne confirmera aucune théorie à proprement parler. Elle ne confirmera que des intimes convictions ! Qui plus est, la non-existence est non prouvable. Alors que la non existence d'autres planètes dans le système solaire est prouvable tant

factuellement (on peut observer partout) que théoriquement (la présence d'une autre planète devrait se « voir » dans le mouvement des autres planètes.

En conclusion, on peut dire que ceux qui soutiennent que les statistiques apportent une preuve de l'existence de vie extraterrestre, avancent une preuve intellectuelle de l'existence qui peut se passer d'une preuve factuelle : ce n'est pas sans rappeler les preuves de l'existence de Dieu !

Conclusion : dire « l n'y a pas de vie extraterrestre » est scientifique (au sens de Popper). Dire : « il y a de la vie extraterrestre » n'est pas scientifique.

Le procès de 1 633 : procès contre l'arrogance ?

En 1623, un nouveau pape venait d'être élu : Urbain VIII. Ce pape admirait beaucoup Galilée. L'Essayeur contenait une dédicace à ce nouveau pape. Ainsi, à partir de 1623, Galilée se sentit de nouveau intouchable.

C'est donc sûr de son immunité qu'il entreprit son « Dialogue sur les deux plus grands systèmes du monde ».

Dans ce livre, Galilée continua à défendre sa théorie des marées. Il envisagea d'appeler son livre : « Dialogue sur le flux et le reflux de la mer ». La dernière et plus importante partie du livre, qui en compte quatre, traite ainsi du flux et du reflux.

Dans ce livre, trois personnages discutent des systèmes de Ptolémée et de Copernic. Salviati défend le système de Copernic. Simplicio est le tenant des traditions et il défend le système de Ptolémée. Il est continuellement ridiculisé. Sagredo est censé être neutre, mais il se rallie fréquemment aux opinions de Salviati.

D'un point de vue scientifique, ce livre n'apporte rien à l'histoire de l'astronomie. Par contre, du côté de la physique, Galilée développe ses idées sur le principe d'inertie et sur la composition des mouvements.

À la toute fin du livre, l'arrogance de Galilée prend le dessus. Le livre se termine par un argument de Simplicio : même si les faits semblent montrer que la Terre tourne autour du Soleil, on peut imaginer que Dieu, dans son infinie puissance, a créé l'illusion de ce mouvement, alors qu'en réalité, c'est le Soleil qui tourne autour de la Terre. Simplicio ayant été continuellement ridiculisé dans le livre, on comprend que l'argument est tourné en dérision. Or Simplicio donne la source de son argument : « une personne très savante et fort éminente, devant laquelle on ne peut que se taire ». Il s'agit du pape lui-même !

Urbain VIII fut convaincu que Galilée l'assimilait à un simple d'esprit !

En 1632, Galilée fut convoqué par l'Inquisition.

Avant le procès, Galilée écrira au neveu du pape qui dirigeait l'affaire :

« L'intimation qui m'a été faite (…) m'a causé une grande peine (…) J'en viens à détester le temps que j'ai consacré […] à ces études […] Je me repens d'avoir exposé […] une partie de mes compositions et j'ai envie de supprimer et de brûler celles qui me restent en main »

Galilée comparut en avril 1633. Le tribunal s'appuya sur le procès-verbal du procès de 1616, dans lequel était mentionné que Galilée ne devait pas enseigner les théories coperniciennes, et cela, de quelque façon que ce soit. Ce document est aujourd'hui sujet à controverse : les historiens pensent que c'est un faux.

En 1633, Galilée fut obligé d'abjurer et fut condamné à la prison à vie (peine rapidement commuée en assignation en résidence surveillée). Le Dialogue fut brûlé et la sentence prononcée contre lui dut être lue publiquement dans chaque université. Galilée mourut à Arcetri en 1642.

Des récits parus un siècle après contribuèrent à fabriquer la légende de Galilée en lui faisant dire après son abjuration : « Et pourtant, elle tourne ! » Cependant, il est peu probable, au vue de la lettre au neveu du pape et des risques encourus dans ce procès (la condamnation au bûcher) que Galilée ait fait preuve d'une telle insolence !

En 1979, le pape Jean-Paul II mit en route une révision du procès de 1633. Les travaux se conclurent en 1992 en disculpant et Galilée, et Bellarmin ! L'affaire fut réduite à « une tragique et réciproque incompréhension entre les deux hommes ».

Ce procès montre surtout les ruses de l'histoire : en 1633, la Nouvelle astronomie de Kepler avait déjà 24 ans et n'intéressait encore personne ! Ce procès, bien les apports théoriques de Galilée en astronomie était très faibles, fit de Galilée la figure héroïque légendaire de la science moderne. Cela tient surtout au caractère arrogant de Galilée.

Einstein a dit de Galilée : « Cela m'a toujours blessé de penser que Galilée ne reconnaissait pas le travail de Kepler. […] Hélas, c'est de la vanité. On constate la même chose chez tant de scientifiques. »

Conséquences du procès

Sur le plan scientifique, le procès aura peu de conséquences.

L'héliocentrisme est définitivement implanté en France comme en Angleterre.

La « preuve » du système keplerien avait déjà été apportée par l'observation du passage de Mercure par Gassendi en application des tables rudolphines le 7 novembre 1631.

Newton - 1643-1727

Brève biographie

Newton entra au Trinity College de Cambridge en 1661 comme « sizar » : étudiant pauvre chargé des basses besognes en échange de la gratuité des cours.

En 1667 il devint « fellow » au College : il était logé, percevait un salaire et devenait membre de la communauté universitaire. En contrepartie, il promit de se consacrer à la théologie et d'embrasser l'ordre anglican dans un délai de 7 ans.

À la suite de ses études bibliques, Newton adopta secrètement l'arianisme dès 1670. L'arianisme tire son nom du moine Arius qui, au Ivème siècle, nia le caractère divin du Christ pour un faire un simple prophète. Il fut excommunié en 325 par le Concile de Nicée. L'arianisme était réapparu en Europe au XVIe siècle et fut de nouveau persécuté. Calvin fit brûler Michel Servet en 1553 pour arianisme.

En 1671, Newton invente le « télescope de Newton ». Ce télescope de 20 cm donnait de meilleurs résultats qu'une lunette d'un mètre !

Les contributions de Newton sont importantes en :

- Optique
- Mécanique
- Astronomie
- Mathématique

Newton va faire la synthèse entre l'astronomie de Kepler et la physique de Galilée.

Il publie son œuvre majeure en 1687 : les principes mathématiques de la philosophie de la nature.

La question de la cause du mouvement des planètes

Pour Galilée, comme pour Ptolémée et Aristote, la cause du mouvement des planètes, c'est Dieu. Il leur a donné au départ un mouvement circulaire et uniforme. Ce mouvement est éternel.

Avec le mouvement elliptique et irrégulier, Kepler est amené à réfléchir à la cause de ce mouvement. Il imagine des « forces » émanant du Soleil. C'est une première ouverture au modèle de Newton.

Kepler conjecture que les marées sont causées par l'attraction de la Lune.

Les idées de Kepler sont entrées en Angleterre dès 1637, date à laquelle des astronomes anglais (Horrocks et Crabtee) montrent que le mouvement de la Lune obéit aux lois de Kepler.

Newton proposera en 1687 sa loi de l'Attraction Universelle qui est une synthèse entre les lois astronomiques de Kepler et les lois sur la chute des corps de Galilée.

Genèse des idées de Newton

En 1660 est créée la Royal Society (l'Académie des sciences anglaise). Parmi les fondateurs, on trouve Christopher Wren et Robert Hooke. Edmund Halley rejoindra rapidement le groupe.

Hooke, inspiré par les travaux de Kepler, s'était intéressé aux théories attractionnistes de Kepler : une force émane du Soleil et décroissant, comme la puissance lumineuse, en raison du carré de la distance. Il aborda cette question avec Wren et avec Newton dans sa correspondance.

La décroissance en fonction du carré de la distance est assez logique : la force se répartit sur toute la surface de la sphère qu'elle atteint. Or la surface d'une sphère est égale à : $4*PI*R^2$. La force est donc égale à : k / R^2.

Lors d'une réunion de la Royal Society, Wren mis au défi ses confrères d'apporter la solution du mouvement des corps célestes.

En 1679, Wren nouvellement élu secrétaire de la Royal Society envoya une lettre à Newton pour lui proposer une collaboration sur cette question en évoquant la force centrale émanent du Soleil. En 1680, Wren récidiva en évoquant une force inversement proportionnelle au carré de la distance.

En 1684, Halley demanda à Newton ce que serait l'orbite des planètes si l'on supposait la force d'attraction du Soleil inversement proportionnelle au carré de la distance. Newton répondit sans hésiter : une ellipse. Sans hésiter car il s'était déjà posé la question et avait déjà calculé le résultat.

La légende veut que Newton ait découvert cette loi en 1665 pendant un séjour de deux ans dans son pays natal.

L'idée est que la Lune est soumise à l'attraction terrestre comme la pomme qui tombe du pommier.

Sans l'attraction terrestre, la Lune irait tout droit. Considérant que le rayon de la Terre est de 6400 km (6371 en fait) et que la distance Terre-Lune = 60 rayons terrestres, la distance Terre-Lune est D = 384 000 km. La lune fait le tour de la Terre en 28 jours (27,322 en fait). En une seconde, la Lune parcourt un angle A = 2*PI / (28*24*3600). On a cos(A) = D/H. Et donc H = D/cos(A). H - D vaut alors la distance parcourue par la Lune quand elle "tombe" vers la Terre : c'est 13 cm en une seconde.

La Lune étant 60 fois plus loin du centre de la Terre que la pomme, la Lune est 60^2 soit 3600 fois moins attirée par la Terre que ne l'est la pomme. Inversement, la pomme est 3600 fois plus attirée par la Terre que ne l'est la lune. Donc, en une seconde, la pomme doit parcourir : 0,13 cm * 3600 = 4,68 mètres, ce qui est à peu près le cas ($h=1/2\ gt^2$).

Comme Descartes, Newton craignait que la célébrité empiète sur son goût de la solitude. En 1770, il écrivait :

> *Je ne vois pas ce qu'a de désirable l'estime publique […] Peut-être cela élargirait-il mes relations, choses que je m'emploie essentiellement à éviter.*

Les Principes mathématiques de la philosophie de la nature - 1687

Dès les premières pages, Newton introduit les notions d'espace absolu et de temps absolu.

Le temps et l'espace préexistent à la création. Ces deux grandeurs sont infinies et homogènes.

Newton définit ainsi le référentiel absolu, qu'il situe au centre de gravité du système solaire.

Les lois de Newton

Première loi : tout corps persévère dans son état de repos ou de mouvement rectiligne uniforme aussi longtemps que des forces extérieures ne le contraignent pas à en changer. C'est le **principe d'inertie.**

Deuxième loi : Le changement de mouvement est proportionnel à la force motrice et s'effectue suivant la droite par laquelle cette force est imprimée. Cette loi établit une **proportionnalité entre la force et l'accélération** et non entre la force et la vitesse.

$$F = m * a$$

Ces deux premières lois explicitent la dynamique du système solaire. Pour la Lune, le principe d'inertie nous apprend qu'elle se déplacerait en ligne droite si elle n'était soumise à aucune force extérieure. Son trajet n'étant pas rectiligne, on peut en inférer qu'elle est soumise à une autre force : la pesanteur qui infléchit sa trajectoire.

Troisième loi : A toute action, correspond une réaction. **Action et réaction sont semblables** en tout sauf en ce qui concerne leurs sens et leurs points d'application.

Quatrième loi : La **loi de la gravitation universelle**. Toute matière est un centre d'attraction.

$$F = g*m*m' / r^2$$

G est une constante universelle. M et M' sont les masses de chaque corps.

R est la distance entre les deux corps

À l'aide de ces principes, Newton élucide des phénomènes jusque-là mystérieux : les lois de Kepler, la cause des marées, la précession des équinoxes.

La lunette de Newton

Le télescope à réfraction

A l'époque de Newton, c'est la seule lunette en cours. C'est celle de Galilée. Elle comporte à l'extrémité opposée à l'oculaire une lentille de grande taille qui concentre la lumière.

Le défaut de cette lunette est d'altérer la lumière.

Le télescope à réflexion

Newton va inventer un nouveau type de télescope : le télescope à réflexion.

La lumière est captée au moyen d'un miroir concave au fond du télescope et renvoyée dans l'oculaire qui se trouve alors latéralement dans la partie haute de la lunette.

Rôle de Halley

L'ouvrage de Newton fut imprimé à 250 exemplaires ! Ils furent diffusés grâce aux travaux de vulgarisation de Halley. Sans son opiniâtreté, on peut penser que cet ouvrage n'aurait jamais vu le jour.

Newton, comme Descartes, n'avait aucun goût pour la célébrité et pensait que pour bien vivre, il fallait vivre caché.

Querelle avec Hooke

Aussitôt le premier volume publié, Hooke réclama une reconnaissance publique pour la loi de la gravitation. Tout en admettant que Newton avait donné une explication supérieure à celle qu'il était capable de fournir, il lui demandait de signaler sa « contribution » dans les volumes suivants.

Newton l'alchimiste

Newton a adhéré secrètement en 1669 à la Société des alchimistes sous le pseudonyme de Jeova Sanctus Unus, anagramme de Isaacus Neuutonus. Il en devint l'un des membres les plus influents.

Il fut absorbé par des pratiques occultistes pendant plus de trente ans. Il fut très sérieusement empoisonné en 1693 par des expériences au cours desquelles il absorba ses concoctions. Cet accident mit fin à ses activités d'alchimiste. Il fut atteint d'une dépression présentant tous les symptômes d'un empoisonnement par le mercure. Un prélèvement récent de ses cheveux a révélé un taux de mercure 40 fois supérieur à la normale de son temps.

Au XXe siècle, le mondialement célèbre économiste anglais, John Maynard Keynes (1883-1946), acquit à une vente aux enchères un coffret renfermant des papiers de Newton. Il y découvrit des notes sur l'alchimie, sur les prophéties bibliques, un plan du temple de Jérusalem où Newton voyait un emblème du système du monde. Keynes confia à une réunion de la Royal

Society : « Newton ne fut pas l'initiateur de l'âge de raison. Il était le dernier des magiciens, le dernier des Babyloniens et des Sumériens ».

Les controverses et le manque de fair-play - 1693-1727

Le cas Leibniz : la controverse avec Leibniz sur la paternité du calcul différentiel.

Il semble que les deux savants ont découvert le calcul différentiel chacun de leur côté par des voies différentes. Newton rejeta les prétentions de Leibniz. Sans honnêteté intellectuelle, Newton fera « condamner » Leibniz par l'Académie qu'il présidait.

Le cas Flamsteed

Newton « pilla » le travail d'observation de Flamsteed (1646-1719), grand astronome anglais.

On peut se poser des questions sur les conséquences de l'auto-empoisonnement de Newton dans ses réactions de vieillesse.

Réception de l'œuvre de newton : les querelles

Le problème de l'attraction

Newton écrit en 1693 :

> *Qu'un corps puisse agir à distance sur un autre dans le vide, sans que rien n'explique par quel moyen cette force est transmise, est pour moi une absurdité si grande qu'à mon avis, quiconque possède une compétence en matière de philosophie ne pourra jamais y céder.*

L'attraction est un concept difficilement compréhensible, même pour Newton.

La nouvelle physique (Galilée, Descartes…) est mécaniste : elle explique les rapports entre les choses par des contacts, des actions mécaniques directes entre elles, à l'exclusion de toute « force occulte ».

Ce refus des forces à distances, qualifiées de « forces occultes » sera le fondement du rejet de l'idée de force d'attraction.

Ce rejet prendra deux formes : la querelle métaphysique (Leibniz) et la querelle scientifique (les cartésiens).

La querelle métaphysique : Leibniz et la querelle de la stabilité du monde

Présentation

La position de Newton conduit Leibniz à considérer que son Dieu est incompétent :

> *Sir Isaac Newton et ses sectateurs ont encore une fort plaisante opinion de l'ouvrage de Dieu. Selon eux, Dieu a besoin de remonter de temps en temps sa montre, autrement elle cesserait d'agir. Il n'a pas eu assez de vue pour en faire un mouvement perpétuel. Cette machine de Dieu est même si imparfaite selon eux qu'il est obligé de la décrasser de temps en temps par un concours extraordinaire, et même de la raccommoder comme un horloger son ouvrage, qui sera d'autant plus mauvais maître qu'il sera obligé plus souvent d'y retoucher d'y corriger.*

Ce que Leibniz reproche à Newton, c'est que le mécanisme de l'attraction nécessite l'intervention permanente de Dieu dans les affaires planétaires pour éviter que les corps célestes, attirés les uns par les autres, ne finissent par s'agglutiner.

A quoi Clarke, l'élève et l'ami de Newton, qui pris en charge la polémique avec Leibniz, répondait :

> *L'idée de ceux qui soutiennent que le monde est une grande machine qui se meut sans que Dieu y intervienne, comme une horloge continue de se mouvoir sans le recours de l'horloger, cette idée, dis-je, introduit le matérialisme et la fatalité, et sous prétexte de faire de Dieu une Intelligentia Supramundana, elle tend effectivement à bannir du monde la Providence et le gouvernement de Dieu. […] Un roi qui n'intervient pas dans son royaume, n'est pas digne d'être roi.*

Leibniz rétorquera :

> *Il vaut mieux dire comme moi que Dieu est l'Intelligentia Supramundana, que d'insinuer comme vous qu'il est l'Intelligentia Mundana, c'est-à-dire l'âme du monde, ce qui conduit droit au panthéisme.*

La querelle s'achèvera avec la mort de Leibniz.

Interprétation

Le problème en jeu est celui de la stabilité du monde, c'est-à-dire de l'histoire du monde.

Pour Leibniz, l'intervention de la gravitation dans l'équilibre du monde, c'est une intervention permanente de Dieu. Ce qui conduit soit à faire de Dieu un piètre architecte, soit à identifier Dieu et la gravitation. Or, pour Leibniz une telle conception implique que Dieu et la Nature sont une seule et même chose : Dieu est l'âme du monde (c'est la conception de Spinoza que Leibniz rejetait radicalement).

Pour les newtoniens, la conception de Leibniz conduit nier la liberté de l'homme et donc au déterminisme radical c'est-à-dire au fatalisme.

La deuxième étape de la révolution copernicienne (évolution, physique quantique, relativité, cosmmogonie), c'est-à-dire l'intervention du temps dans la science, résoudra en partie le problème : le matérialisme ne conduit nécessairement ni au panthéisme, ni à l'athéisme.

La querelle scientifique : les cartésiens et la querelle de la figure de la Terre

Descartes (1596-1650) et les tourbillons

La cosmologie de Descartes est faite de « tourbillons ». C'est une théorie curieuse et un peu confuse car, après le procès de Galilée, Descartes voulait éviter de passer pour un copernicien.

Pour Descartes, les étoiles sont au centre de tourbillons entraînant des planètes. Il n'y a pas de vide. Le Monde est rempli d'une matière subtile : l'éther. La matière et l'espace sont identifiées à une substance appelée « étendue ». Les planètes sont transportées dans cette étendue tourbillonnante comme un bouchon qui flotte.

Pour Descartes, les planètes sont d'anciennes étoiles lentement recouvertes de matière comme les tâches solaires.

Du fait du prestige de Descartes, cette théorie des tourbillons va se maintenir longtemps en France, en retardant la réception tant du travail de Kepler que de celui de Newton.

En 1734, Voltaire écrira :

> *Un Français qui arrive à Londres trouve les choses bien changées en philosophie comme dans tout le reste. Il a laissé le monde plein ; il le trouve vide. À Paris, on voit l'univers composé de tourbillons de matière subtile ; à Londres, on ne voit rien de cela. […] Chez vos cartésiens, tout se fait par une impulsion qu'on ne comprend guère ; chez M. Newton, c'est par une attraction dont on ne connaît pas mieux la cause. À Paris, vous vous (imaginez) la terre faite comme un melon ; à Londres, elle est aplatie des deux côtés. La lumière, pour un cartésien, existe dans l'air ; pour un newtonien, elle vient du soleil en six minutes et demie.*

L'Académie des sciences et les Cartésiens

L'Académie des Sciences est fondée par Colbert, ministre de Louis XIV, en 1666. Elle regroupe plusieurs savants du pays et qui seront rapidement rejoints par des étrangers célèbres (Huygens, Cassini, Roëmer). En 1667, Louis XIV décidera la création de l'Observatoire de Paris (l'observatoire de Greenwich sera créé en 1675).

L'Académie est composée pour la plupart de cartésiens, malgré l'interdiction de l'Eglise. Fontenelle en deviendra le secrétaire perpétuel en 1699 et jusqu'en 1740. Fontenelle étant cartésien, l'Académie le restera aussi.

Les cartésiens partagent le souci de Leibniz sur la stabilité du monde, mais ils ne veulent pas s'engager dans des discussions métaphysiques. Ce qu'ils veulent, ce sont des preuves expérimentales pour valider la physique de Newton.

Leur querelle sera donc celle de la figure de la Terre : Newton a déduit de sa loi et du ralentissement des pendules à l'équateur (observations de Richer en 1672 et de Halley en 1676) que la Terre devait être aplatie aux pôles (aujourd'hui on sait que le diamètre équatorial est d'environ 12 756 km contre un diamètre polaire d'environ 12 713 km, soit un aplatissement relatif de l'ordre de 1/300. La force centrifuge est en sens opposé à la force de gravitation à l'équateur : elle conduit donc à une diminution de cette force à l'équateur ; tandis qu'au pôle, la force centrifuge est perpendiculaire à la force de gravitation et est donc sans effet sur elle, d'où l'aplatissement aux pôles). Mais sur la foi de mesures effectuées entre 1682 et 1718 pour dresser la carte de France, Cassini et son fils, membres de l'Académie des sciences, prétendent que la Terre est allongée selon l'axe des pôles. Il s'avère que ces mesures étaient entachées d'erreurs.

La querelle sera résolue avec la mesure du rayon terrestre en Laponie par l'académicien français Maupertuis en 1737. On y reviendra.

Fontenelle écrira encore une « théorie des tourbillons » en 1752, à l'age de 95 ans (il mourra à 100 ans).

La querelle avec l'Eglise

Avec la fin des guerres de religion (fin de la guerre de 30 ans en 1648), la révolution en Angleterre, le développement de l'Etat en France, la papauté n'a plus de prise sur les questions scientifiques.

En 1744, Benoît XIV, surnommé le pape des savants, libère l'édition du Dialogue de Galilée, avertissant seulement qu'on doit considérer le mouvement de la Terre comme une hypothèse. En 1758, il autorisera d'autres publications héliocentriques.

Premières preuves du système newtonnien

James Bradley (1693-1762) et la preuve des mouvements de la Terre : l'aberration des fixes, 1729

L'aberration des fixes est l'angle formé entre la direction apparente d'une étoile et sa direction vraie.

Dès 1713, James Bradley (1693-1762), astronome britannique, va, en compagnie de Edmund Halley (1656-1742), établir la parallaxe de Mars, et calculer l'unité astronomique entre 149 et 200 millions de kilomètres.

Plus tard, Bradley constate que les étoiles qui semblent fixes dans le ciel sont en réalité animées d'un très léger déplacement de période annelle, sur de petites orbites elliptiques d'environ 40 secondes d'arc. Il constate que variations les plus notables de position se produisent non pas annuellement, mais quotidiennement. En 1728, il a observé plus de 200 étoiles et constate qu'elles se comportent toutes de la même façon. Ces deux dernières constatations font tomber l'hypothèse de la mesure de la parallaxe (la parallaxe stellaire sera mesurée pour la première fois en 1838 par Bessel).

C'est en observant une girouette en haut du mât d'un bateau, et en constatant qu'elle semble changer de direction chaque fois que l'embarcation vire de bord, qu'il trouva la solution du problème. De même que c'est l'orientation du bateau qui change et pas celle du vent, de même, c'est l'orientation de la Terre qui change et pas celle de la lumière.

Bradley publie sa théorie de l'aberration des étoiles fixes en 1729.

Cette théorie est traditionnellement considérée comme la première preuve du mouvement de la Terre. C'est la vitesse de la lumière associée à la vitesse orbitale de la Terre qui explique cette apparence de mouvement des étoiles.

La question de la preuve

Pourquoi considère-ton que c'est Bradley qui a prouvé le système copernicien et pas Gassendi ?

La preuve de Bradley : la théorie permet de rendre compte d'un phénomène existant.

La preuve de Gassendi-Kepler : une théorie prévoit un phénomène qui n'existe pas encore, et donc en rend compte, comme la précédente, une fois qu'il existe.

Cette deuxième preuve est donc supérieure à la première sur le plan épistémologique puisqu'elle prévoit l'existence en plus d'en rendre compte.

Les trois preuves suivantes sont du deuxième type : elles prévoient un phénomène et constatent son existence effective.

Dans tous les cas, la question épistémologique fondamentale reste : « Prouve ta preuve ».

La forme de la Terre, 1737 : la fin des tourbillons

La victoire du définitive de Newton sur les cartésiens vint avec la mesure d'un degré de méridien en Laponie (vers 75° de latitude) et au Pérou (proche de l'équateur).

La mission en Laponie, entre 1736 et 1737, dirigé par Maupertuis accompagné du mathématicien Clairaut, donna une mesure de 57 420 toises pour un degré de méridien (soit 111 900 mètres, avec une toise = 6 pieds ; 1 pied = 0,3248 mètre).

La mission au Pérou, réalisée entre 1735 et 1744, donna un résultat net sans appel : un degré de méridien valait 57 420 toises (soit 111 178 mètres).

Les trois grands noms de l'introduction des idées de Newton en France

- C'est le mathématicien et naturaliste Maupertuis (1698-1759), qui fit entrer le newtonianisme en France. Académicien depuis 1723, il devint newtonien à l'occasion d'un voyage en Angleterre où il rencontra Halley. En 1732 il écrivait : « pourquoi l'attraction serait-elle moins concevable que l'impulsion ? ». Il acquit alors la réputation de newtonien.

  D'Alembert en 1751 écrira dans l'Encyclopédie :

  > *Maupertuis fut le premier qui ait osé parmi nous se déclarer ouvertement newtonien. Il a cru qu'on pouvait être bon citoyen sans adopter aveuglément la physique de son pays, et, pour attaquer cette physique, il a eu besoin d'un courage dont on doit lui savoir gré.*

- Maupertuis fut secondé par Voltaire dans l'introduction des idées de Newton en France. Voltaire ut séduit par les idées de Locke et de Newton pendant son séjour obligé en Angleterre, pays considéré alors, après les deux révolutions anglaises, comme un pays de liberté. La publication des Lettres philosophiques en 1734 (appelées à l'origine Lettres anglaises) participèrent à vulgariser les idées de Newton.
- Mme du Châtelet qui donna refuge à Voltaire en 1734 après que ses « Lettres philosophiques» furent jugées en France « contraires à la religion, aux bonnes mœurs et au respect dû aux puissances ».

Le retour de la comète de Halley, 1759

La théorie des comètes

En utilisant la théorie de Newton, Edmund Halley (1656-1742) rend compte en 1705 du mouvement des comètes : les comètes se déplacent sur des trajectoires elliptiques comme les planètes. Le Soleil est un des foyers de cette ellipse. Le lien entre comète et Soleil est mis en évidence.

La prévision de Halley

Après avoir étudié les orbites de 24 comètes observées entre 1337 et 1698, Halley concluait que celles de 1531, 1607 et 1682 étaient le même objet : la comète depuis appelée « comète de Halley ».

Il tirait ses conclusions de l'étude des plans orbitaux, de la distance minimale au Soleil (périhélie) et de l'écart de temps voisin entre les événements (76 ans et 62 jours dans un cas, 74 ans et 324 jours dans l'autre). Il prévit donc le retour de la comète pour décembre1758.

Le retour de la comète

En 1757, Clairaut décida de recalculer les prévisions de Halley : plus de 6 mois de calculs acharnés ! Les résultats indiquaient que la comète devait passer au périhélie en avril 1759, avec une incertitude d'un mois. La comète fut trouvée à la lunette le 25 décembre 1758, et fut visible à l'œil nu du 13 mars 1759 jusqu'au 22 juin.

Cet événement marqua le triomphe de Newton.

La comète de Halley réapparaît tous les soixante-seize ans. Son passage a été consigné à trente reprises entre 240 av. J.-C. et 1986. Sa prochaine apparition est prévue pour 2061. Les dates auxquelles la comète est visible de la Terre correspondent au moment où elle atteint sa périhélie, c'est-à-dire le point de son orbite le plus proche du soleil. Certains astronomes pensent que la comète s'est désintégrée après sont dernier passage en 1986.

Dessin réalisé d'après la tapisserie de Bayeux, dite « de la reine Mathilde », (fin du XIe siècle), montrant ce qu'on nommera plus tard « la comète de Halley ».

Les comètes aujourd'hui

Les comètes sont des petits astres brillants du Système solaire dont l'orbite a généralement la forme d'une ellipse très allongée, et souvent accompagné d'une longue traînée lumineuse due à l'interaction entre la comète à vitesse élevée au voisinage du Soleil et le vent solaire. Les comètes sont constituées d'un noyau rocheux pouvant aller jusqu'à plusieurs dizaines de kilomètres de diamètres. Ce noyau est riche en glaces et poussières. En s'approchant du Soleil (quelques centaines millions de kilomètres), une queue apparaît, constituée de poussière et de glace sublimée.

Les comètes représentent une partie de la matière restant après la formation du Soleil et des planètes du Système Solaire il y a 4,6 milliards d'années. Les comètes semblent issues d'un immense réservoir, appelé nuage de Oort situé à 50 000 unités astronomiques. Perturbées par les planètes, elles parcourent des orbites elliptiques qui les amènent jusqu'à 15 unités astronomiques du Soleil.

La découverte de Neptune, 1846

Après la découverte d'Uranus en 1781, des observations précises montrent qu'elle ne suit pas exactement la trajectoire prévue par les lois de Newton.

A l'observatoire de Paris, Alexis Bouvard (1767-1843) et François Arago (1786-1853) imaginent l'existence d'un astre perturbateur.

John Cough Adams (1819-1892) et Urbain Jean Joseph Le Verrier (1811-1877) entreprennent les calculs pour localiser l'astre perturbateur.

C'est l'Allemand Johann Gottfried Galle (1812-1855) assisté de Heinrich Arrest (1822-1875) qui découvre la nouvelle planète le 23 septembre 1846 à l'observatoire de Berlin.

Elle est baptisée Neptune par le Bureau des Longitudes de Paris.

Mesure du système solaire

Géographie

Le problème des longitudes : le chronomètre de 1735

Depuis l'Antiquité, les hommes savent mesurer les latitudes[2]. Il suffit, de jour, de mesurer la hauteur maximum du Soleil, et de nuit, de mesurer celle de l'étoile polaire.

Les latitudes sont mesurées avec des astrolabes. Cet instrument a été adapté à un usage en mer par Newton et d'autres, devenant le « quart de cercle » ou quadrant, puis le sextant.

Par contre la mesure des longitudes est beaucoup plus difficile et pose des problèmes de navigation qui se sont accrus avec les échanges transatlantiques.

L'étude des satellites de Jupiter permet de mesurer la longitude. Mais ce n'est pas pratique en mer.

Pour connaître sa longitude en mer, il faut connaître l'heure, puisque les constellations traversent le ciel à raison de 15° par heure. Mais, les balanciers des horloges ne fonctionnent plus dans le roulis de la mer.

John Harrison (1693-1776) réussit le premier à construire un chronomètre marin en 1735. C'est ce qui permettra la solution du problème des longitudes.

De ce fait, l'observatoire de Greenwich va devenir la référence temporelle mondiale, détrônant celui de Paris. Ce choix sera officialisé en 1884 lors de la conférence internationale sur le méridien. La France attendra 1911 pour délaisser le méridien de Paris et se rallier au méridien de Greenwich.

Picard - 1620-1682 - La mesure de la Terre

1672 : La mesure du rayon terrestre

L'Abbé Jean Picard, un des 7 premiers membres de l'Académie des sciences, fut chargé par Louis XIV d'établir la carte de France.

Il a aussi arpenté pendant deux ans la distance Paris - Amiens avec des perches en bois de 8 mètres. Paris et Amiens sont situés sur la même longitude. Avec sa distance, il reprit la méthode d'Eratosthène et aboutit à un résultat très proche des mesures actuelles. Cette mesure permit à Newton de parachever sa théorie.

La forme de la Terre, 1744

Cf. les premières preuves du système newtonien.

Taille du système solaire

La mythologie

Dans la mythologie grecque, le Soleil grec est si proche de la Terre, qu'il suffit de s'en rapprocher un peu pour se brûler les ailes (mythe d'Icare). Phaéton (demi-dieu fils d'Hélios, dieu du Soleil) conduit le char du Soleil et, perdant le contrôle, se heurte brutalement aux étoiles.

---

[2] La latitude est une mesure sur un axe nord-sud. La latitude d'un point, c'est la distance angulaire d'un point par rapport à l'équateur, mesuré en degré d'angle par l'arc du méridien ; tous les points d'un parallèle ont la même latitudes.

Le méridien est cercle imaginaire passant par les pôles.

La longitude est une mesure sur un axe est-ouest. La longitude d'un point, c'est la distance angulaire entre le plan du méridien passant par le point considéré et le plan du méridien de référence.

Héraclite (vers -540 -475) et Lucrèce (vers -99 -55) imaginaient un Soleil du diamètre d'un bouclier.

Les astronomes sumériens, chinois ou coréens de l'Antiquité montaient en haut des tours (les ziggourats) pour observer le ciel, pensant ainsi avoir une vue meilleure en s'étant rapproché.

Le géocentrisme classique de Ptolémée

On estime le rayon de l'univers géocentrique de Ptolémée à environ 80 millions de kilomètres (la sphère des étoiles fixes).

Aujourd'hui l'unité astronomique vaut 150 millions de kilomètres, c'est-à-dire la distance Terre-Soleil. Saturne se situe à 1 500 millions de kilomètres du Soleil et Pluton encore 4 fois plus loin. Le système solaire actuel est environ 100 fois plus grand que l'univers de Ptolémée.

Cependant, l'univers de Ptolémée conduit à une vitesse des étoiles de 5 800 kilomètres par seconde pour faire un tour complet en 24 heures Un univers ptoléméen 50 fois plus grand amènerait à une vitesse des étoiles égale à celle de la lumière !

La cosmologie géocentrique entrave donc l'appréciation des dimensions de l'espace.

Cependant, dans un système héliocentrique, la vitesse à la surface de la Terre est de 1667 km / h. C'était un argument fort contre le mouvement diurne de la Terre. De plus, si la Terre était à 10 millions de km du Soleil, la vitesse de révolution serait de 7 000 km / h (elle est en réalité d'environ 100 000 km par heure).

L'héliocentrisme d'Aristarque

C'est le premier à considérer que le Soleil est plus grand que la Terre. C'est peut-être cette hypothèse qui l'a conduit à un système héliocentrique. Il est en effet contraire au bon sens d'imaginer un centre plus petit que ses satellites.

Aristarque place le soleil à 19 fois la distance de la Lune, qu'il avait estimé à 60 rayons terrestres (soit environ 380 000 km pour la distance Terre-Lune, ce qui est à peu près juste, et 7 millions de kilomètres pour la distance Terre-Soleil, au lieu de 150 millions).

Le Soleil étant au centre de l'univers, la distance Terre - étoile varie en fonction de l'année. Comme on ne constate pas de différence dans la perception des étoiles quel que soit le jour de l'année, Aristarque en déduit que les étoiles sont extrêmement éloignées de la Terre.

Conception copernicienne

Etant donné la constante luminosité des constellations du Zodiaque, on estime au XVIe siècle, avec la théorie héliocentrique, que le rayon minimal de la sphère des étoiles fixes est 1,5 million de fois plus grand que le rayon de la Terre, soit un univers d'environ 10 000 millions de kilomètres de rayon, c'est-à-dire 125 fois plus grand que celui de Ptolémée (80 millions de kilomètres de rayon).

La 3ème loi de Kepler

Avec la troisième loi de Kepler : P^2 / R^3 = constante, on sait que Saturne est 10 fois plus loin du Soleil que la Terre, et que Mars est 1 fois et demi plus loin du Soleil que la Terre.

Les méthodes de mesure : la micrométrie et la parallaxe

La micrométrie consiste à mesurer le diamètre apparent d'un astre. Connaissant son diamètre réel, on peut alors en déduire sa distance. La mesure de la distance est donc fonction de la spéculation sur le diamètre réel.

La parallaxe consiste à faire deux mesures au même moment de deux endroits séparés de plusieurs milliers de kilomètre. On mesure alors le décalage d'un objet proche (une planète) par

rapport à un objet lointain (une étoile). La difficulté consiste alors à mesurer la distance entre les deux points et à être sûr que les mesures sont faites au même moment.

On peut aussi faire deux mesures au même endroit mais à deux moments différents.

Horrocks - 1619-1641

Après l'échec de l'observation du passage de Vénus devant le Soleil en 1631, le pasteur anglais Jeremiah Horrocks (1619-1641) prédit le passage suivant de Vénus pour le dimanche 4 décembre 1639 à 3 h p.m. (24 novembre 1639 du calendrier julien).

Il observa ce passage depuis son village de Hoole (près de Preston) en projetant l'image du Soleil sur un papier gradué et réalisa ainsi la première mesure d'un passage de Vénus devant le Soleil.

À l'aide de cette observation, Horrocks estima que le diamètre apparent de Vénus ne devait pas être supérieur à la minute d'arc et que la valeur de la parallaxe solaire ne devait excéder 14", ce qui conduisait à une distance Soleil-Terre d'environ 14700 rayons terrestres (94 millions de kilomètres).

Huygens - 1629-1695

Huygens découvre un satellite de Saturne en 1655.

Huygens conjecture que le diamètre de Mars doit être égal à environ 60% de celui de la Terre (le chiffre exact est de 53%). Cela lui permet, par micrométrie, de déduire une distance Terre-Soleil de 160 millions de kilomètres.

Cassini - 1625-1712

Jean-Domininque Cassini (1625-1712) est un italien qui a d'abord enseigné l'astronomie à l'Université de Bologne, alors sous la domination du pape.

Sa renommée lui est venue avec la publication en 1668 d'une table astronomique sur les mouvements des satellites de Jupiter. Il a été appelé en France en 1669 pour diriger l'observatoire de Paris nouvellement créé.

Il fit de cet observatoire le premier centre moderne : la précision des mesures était de la seconde d'arc. Rappelons que celles de Tycho Brahé à Uraniborg entre 1576 à 1597 étaient de 2 minutes, et que celles des prédécesseurs de Brahé étaient de 30 minutes (un demi-degré). Du fait des turbulences atmosphériques, il est difficile de faire mieux que la précision atteinte par Cassini.

Cassini va tenter de mesurer la distance Terre - Mars. Il va mesurer la parallaxe de la planète. Deux méthodes sont utilisées : faire deux mesures du même observatoire avec un décalage dans le temps (de 6 heures). Faire deux mesures au même moment dans deux observatoires différents. C'est ainsi qu'une expédition fut organisée vers la Guyane en 1672.

Le jeu d'observation a permis de déduire une distance Soleil-Terre de 146 millions de kilomètres (contre 150 millions aujourd'hui). Cependant, on ne sait pas exactement comment ce résultat a été obtenu !

Bradley et Halley James (1693-1762), astronome britannique

Bradley (1693-1762). Vers 20 ans, en compagnie de Edmund Halley (1656-1742), il établit la parallaxe de Mars, et calcule l'unité astronomique entre 149 et 200 millions de kilomètres.

Tableau synthétique de la connaissance des distances Terre-Soleil

Date	Astronome	Valeur de la distance Terre-Soleil	Taille de l'Univers : distance Terre-étoiles

		En rayons terrestres	En distance Terre-Lune	En millions de km	En millions de km
-611, -547	Anaximandre	**54**	1		
-400, -355	Eudoxe	540	9		
-310, -230	Aristarque de Samos	1 140	**19**	7,5	
-190, -120	Hipparque	2 490 (?)			
90-168	Ptolémée	1 210		8	80
1473-1543	Copernic	1 500			10 000
1639	Horrocks	14 700		94	
1659	Huygens			160	
1672	J. D. Cassini	-		139	
Vers 1713	Bradley et Halley	23 400 à 31 400	391 à 524	149 à 200	

La distance Terre-Lune vaut 381 547 km en moyenne soit environ 60 rayons terrestres.

Une année-lumière vaut environ 9 500 milliards de km, soit environ 63 000 distance Terre-Soleil.

En 1761 et 1769, les astronomes vont utiliser deux passages de Vénus devant le Soleil pour tenter d'améliorer la connaissance de la distance Soleil-Terre, mais sans succès. Il faudra attendre le XXème siècle et le passage au plus près de la Terre de l'astéroïde Eros pour affiiner sensiblement la valeur.

Caractéristiques modernes du système solaire

	☉	☿	♀	⊕		♂	♃	♄	♅	♆	♇	
	Soleil	Mercure	Vénus	Terre	Lune	Mars	Jupiter	Saturne	**Uranus**	**Neptune**	**Pluton**	**2003 UB313**
Année de découverte	*	*	*		*	*	*	*	**1781**	**1846**	**1930**	**2005**
Distance moyenne au Soleil (en UA)	0	0,39	0,72	1,00	1,00	1,52	5,20	9,94	19,18	30,06	39,44	67,67
Excentricité de l'orbite		0,21	0,01	0,02		0,09	0,05	0,06	0,05	0,01	0,25	0,44
Inclinaison par rapport à l'écliptique		7	3,4	0,0		1,85	1,3	2,49	0,77	1,77	17,2	44,1
Période de révolution autour du soleil (en année)	0	0,24	0,62	1		1,88	11,86	29,46	84,01	164,79	247,7	557
Rayon relatif	109	0,38	0,95	1	0,27	0,53	11,2	9,42	4,10	3,88	0,18	0,45
Satellites connus	9	0	0	1		2	63	48	27	13	3	1
Années de découverte						1877	1610	1610	1787	1846	1978	2005
Anneaux							oui	oui	oui	oui		

UA : unité astronomique : distance Terre-Soleil = 150 millions de km.

Le rayon moyen de la Terre est de : 6371 km.

Rayon de la Lune : 1738 km. Distance Terre-Lune = 381 547 km.

L'excentricité d'une ellipse : c'est le rapport de la distance entre les foyers à la longueur du grand axe. L'excentricité est toujours inférieure à 1. L'excentricité d'un cercle est égale à 0.

L'excentrique de la Terre vaut 0,02, c'est-à-dire que le foyer est décalé du centre de 2% de la taille du rayon (soit environ 3 millions de kilomètres).

L'écliptique : dans un système géocentrique, c'est le trajet apparent du Soleil sur la sphère céleste au cours de l'année, vu depuis la Terre. Dans le système héliocentrique, ce grand cercle est en fait le changement de perspective que l'on a du Soleil, sur fond d'étoiles, le long de l'orbite terrestre : il matérialise donc le plan de l'orbite terrestre.

Le zodiaque : c'est la ceinture de la sphère céleste s'étendant à 8,5 degrés de latitude de part et d'autre de l'écliptique, et dans laquelle se situe le mouvement apparent du Soleil, de la lune et des 5 planètes visibles à l'œil nu (Mercure, Vénus, Mars, Jupiter, Saturne). Le zodiaque est partagé depuis l'Antiquité en 12 parties égales de 30° de longitude. Chaque partie est appelée « signe du zodiaque ». Les 8,5 degrés correspondent au 7 degrés d'inclinaison du plan orbital de Mercure par rapport au plan de l'écliptique.

Conclusion

Le système solaire actuel est plus de 100 fois plus grand que l'univers de Ptolémée (2003UB313 ≅ 67 UA, et rayon de l'univers de Ptolémée ≅ 0,5 UA.

L'univers actuel à une taille d'environ 150 mille milliards de milliards de kilomètres ($150*10^{21}$) : 15 milliards d'années-lumière (une année lumière ≅ 10 mille milliards de kilomètres, 10^{13}). Il est donc environ 1 million de milliards de fois plus grand que l'univers de Ptolémée (10^{15}), et 10 mille milliards de fois plus grand que l'univers de Copernic.

Ces changements d'échelle sont à comparer avec :

- L'âge de la Terre au début du 19ème siècle (moins de 10 000 ans), contre 15 milliards d'année aujourd'hui, soit environ 2 millions de fois plus vieux (10^6).
- Le nombre d'Avogadro (nombre de molécules présentes dans une mole de tout composé chimique) : $6*10^{23}$. Et la masse d'un atome d'hydrogène : environ $1,7.10^{-27}$ kg.
- Le diamètre d'un atome d'hydrogène : environ 1 Å (10^{-10} m).

Peuplement du système solaire

4 satellites de Jupiter, (Galilée, 1610)

Découverts par Galillée, le nouveau Collomb.

Les anneaux de Saturne (Galilée, 1610)

Découverts par Galillée, le nouveau Collomb.

5 satellites de Saturne (Huygens, 1655) - (Cassini, 1671, 1672 et 1684)

Le premier satellite de Saturne, Titan, a été découvert en 1655 par Huygens.

Cassini va découvrir 4 autres satellites de Saturne : Japet et Rhéa en 1671 et 1672, et Thétys et Dioné en 1684.

La comète de Halley (Halley, 1705)

Uranus (Herschel, 1781)

Herschel découvre par hasard Uranus. Ce n'est certainement pas le premier à l'avoir observé. Mais c'est le premier, grâce à sa phénoménale connaissance de la carte stellaire, à l'avoir identifiée comme une nouvelle planète.

Uranus double la taille du système solaire.

2 satellites d'Uranus : Titania et Obéron (Herschel, 1787)

2 satellites de Saturne : Encelade et Mimas (Herschel, 1789)

8 comètes (Caroline Herschel, v. 1790)

Les astéroïdes : à partir de 1801

Kepler avait fait remarquer qu'il semblait y avoir une rupture entre les planètes proches du Soleil, jusqu'à Mars, et les autres, Jupiter et Saturne à l'époque.

En 1766 et 1772, les Allemands Tietz et Bode propose une loi empirique reliant l'éloignement des planètes par rapport à leur rang. La découverte d'Uranus en 1781 vient conforter la loi de Tietz-Bode. Or, cette loi suggère l'existence d'une planète entre Mars et Jupiter.

Les astronomes de toute l'Europe vont commencer à chercher cette planète manquante. Elle est découverte le 1er janvier 1801, puis perdue le 11 février 1801. C'est Gauss qui saura calculer son orbite et permettre de la retrouver le 1e janvier 1802.

Une deuxième petite planète circulant entre Mars et Jupiter est découverte la même année. Puis une 3ème en 1804 et une 4ème en 1807. La 5ème astéroïdes sera découverte en 1845. En 2003, on en compte plus de 30 000 dont l'orbite a pu être calculée, tandis que 100 000 autres ne bénéficient que d'une dénomination provisoire, dans l'attente d'une détermination plus précise de leur trajectoire.

Neptune, 1846

Cf. Les premières preuves du système newtonien.

2 satellites de Mars : le mythe des martiens se développe, 1877

Mars est une planète proche de la Terre, de taille similaire, de période de révolution comparable. On peut bien l'observer, ce qui n'est pas le cas de Vénus du fait de son atmosphère. Ainsi Huygens et Cassini ont-ils vu des calottes blanches aux pôles de mars. William Herschel a fait le parallèle entre ces calottes blanches et les calottes polaires de la Terre. La découverte de deux satellites en 1877 a ajouté à la similitude entre la Terre et Mars. Il n'en faut pas plus pour que des traces sur le sol de Mars soient assimilées à un système de canaux comme ceux des grands travaux de l'époque où se creusaient les canaux de Suez et de Panama.

Pluton, 1930

Elle a été découverte en 1930 par Clyde W. Tombaugh. Pluton est la plus petite planète du système solaire et son orbite est très excentrique.

Pluton fut découvert en 1930 lors de la recherche d'un corps céleste permettant d'expliquer les perturbations orbitales d'Uranus et Neptune, hypothèse proposée par Percival Lowell comme étant la Planète X.

La ceinture de Kuiper et la fin de la planète X, 1992

C'est une deuxième ceinture d'astéroïdes située après Pluton.

La ceinture de Kuiper est une zone du système solaire, s'étendant au-delà de l'orbite de Neptune, entre 30 et 50 unités astronomiques (Pluton est à 40 unités)^. Cette zone, en forme d'anneau, est sans doute composée de plus de 35 000 objets de plus de 100 km de diamètre, essentiellement situés dans le plan de l'écliptique. Sa masse totale est donc plusieurs centaines de fois supérieure à celle de la ceinture principale d'astéroïdes située entre Mars et Jupiter.

L'astronome Gerard Kuiper futr le premier à en postuler l'existence dès 1951. Il l'avait alors décrite comme la source des comètes à courte période de révolution (celles qui tournent autour du Soleil en moins de 200 ans), ce qui venait compléter es travaux de Jan Oort en 1950, pour qui

les comètes à longue période de révolution proviendraient d'une zone extrêmement éloignée du soleil nommée Nuage d'Oort.

Il s'agit certainement des ultimes vestiges du disque d'accrétion à l'origine du système solaire. Les parties denses, à l'intérieur du disque, se sont condensées sous forme de planètes, alors que le bord externe, plus diffus, a produit un grand nombre de petits objets.

C'est en 1992 qu'un premier objet a été observé dans la ceinture de Kuiper : le (15760) 1992 QB1.

La découverte de la ceinture de Kuiper a sans doute marqué la fin de la recherche de la 10ème planète, censée suivre la neuvième planète Pluton. En effet, la présence de la ceinture explique à elle seule les anomalies orbitales de Neptune et d'Uranus.

2003 UB313, 10ème planète, 2005

2003 UB313 fut découvert par l'Américain Michael E. Brown le 5 janvier 2005 sur des photographies prises le 21 octobre 2003. Sa découverte fut annoncée le 29 juillet 2005. 2003 UB313 a un diamètre d'environ 3000 km, soit quasiment celui de la Lune (3476 km), et donc plus que les 2350 km de Pluton. Corps céleste du système solaire le plus important depuis la découverte de Neptune en 1846, 2003 UB313 pourrait donc reléguer Pluton au 10ème rang des planètes en orbite autour du Soleil. Lors de sa découverte il était à 97 unités astronomiques de notre étoile, soit trois fois plus loin que Pluton, ce qui rend les mesures difficiles. 2003 UB313 possède un satellite.

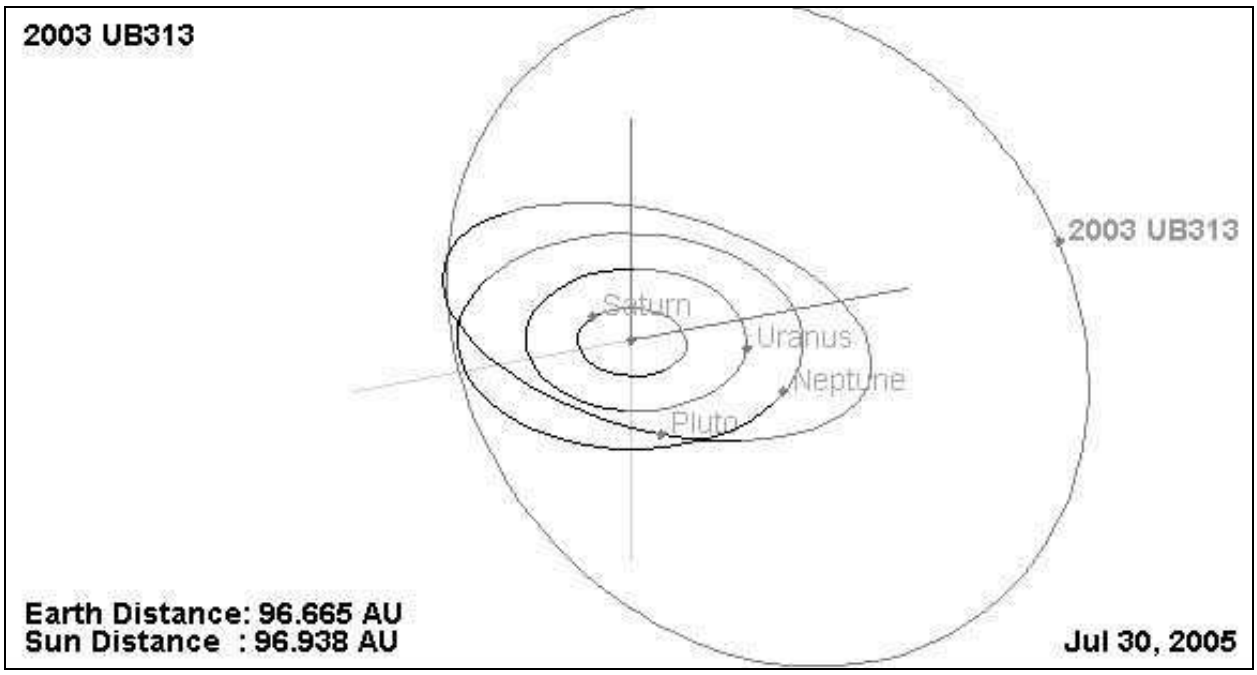
Le diamètre de 2003 UB313 a été mesuré par le télescope spatial Hubble (40 milliarcsecondes) ce qui est mesurable par Hubble grâce à des techniques de traitement d'image sophistiquées. L'article de la revue Nature du 2 février 2006 donne une nouvelle mesure de taille de l'objet: 3000km ± 300km ±100 km.

Le statut de planète

Aujourd'hui certains scientifiques remettent en cause le statut de planète de Pluton. Selon eux, il est possible que Charon, Pluton et Triton (le plus gros satellite de Neptune), soient trois anciens astéroïdes de la ceinture de Kuiper qui en auraient été extraits par la planète géante.

Historiquement, les quatre premiers astéroïdes découverts ((1) Cérès, (2) Pallas, (3) Junon et (4) Vesta) furent considérés comme des planètes pendant plusieurs décennies (leurs dimensions n'étaient pas vraiment connues à l'époque). Certains textes astronomiques du début du XIXe siècle font référence à onze planètes (incluant Uranus et les quatre premiers astéroïdes).

Peut-être qu'à l'avenir Pluton connaîtra le même sort que ces astéroïdes...



Synthèse

- **À la fin du 16ème siècle :** l'Univers, comme depuis toujours, est composé de 7 planètes, un Soleil et quelques milliers d'étoiles fixes.
- **À la fin du 17ème siècle :** 10 satellites supplémentaires peuplent le système solaire. Des milliers d'étoiles supplémentaires ont été découvertes.
- **À la fin du 18ème siècle :** 1 planète et 4 nouveaux satellites ont été découverts par Herschel, qui publie aussi un catalogue de plus de 1000 nébuleuses.
- **À la fin du 19ème siècle :** 1 planète et 8 nouveaux satellites ont été découverts, auxquels s'ajoutent 10 astéroïdes pour la première moitié du 19ème siècle, et environ 450 autres pour la deuxième moitié du 19ème siècle grâce à l'essor de la photographie astronomique.
- **Avant la seconde guerre mondiale :** 1 planète, 6 nouveaux satellites et plusieurs centaines d'astéroïdes ont été découverts.
- **Depuis la fin de la seconde guerre mondiale :** 1 planète, plus de 100 satellites et environ 160 000 astéroïdes ont été découverts (ceci essentiellement grâce aux progrès économique et technique : conquête spatiale et informatisation).
- Aujourd'hui, on compte 10 planètes, 158 satellites et 160 000 astéroïdes, et la moisson n'est pas terminée.

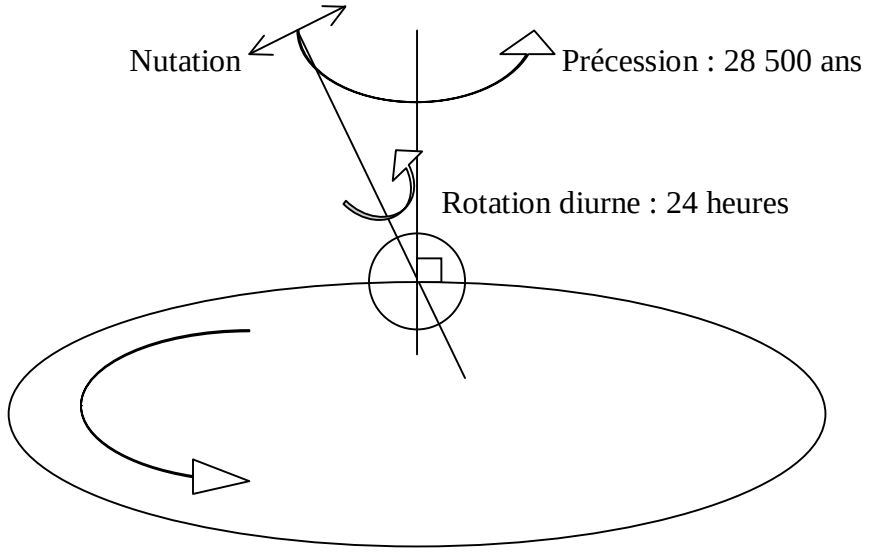
Tableau des objets du système solaire

À la fin de ce document, on trouvera la liste de tous les objets actuellement identifiés dans le système solaire.

Le quatrième mouvement de la Terre : la nutation

La nutation est l'oscillation périodique de l'axe de rotation de la Terre autour de sa position moyenne. Elle est due aux attractions gravitationnelles du Soleil et de la Lune.

Bradley (1693-1762) découvrira ce mouvement 20 ans après l'aberration de la lumière.



Rotation annuelle : 365 jours 5 heures 48 minutes et 46 secondes

Moyens d'observation : lunettes et observatoires

Galilée : le télescope à réfraction

Le télescope à réfraction, c'est la lunette de Galilée. Elle comporte à l'extrémité opposée à l'oculaire une **lentille** de grande taille qui concentre la lumière.

Ces lunettes seront améliorées avec l'ajout de réticule et de micromètre (la lunette de Auzout et Huygens).

Le défaut de cette lunette est d'altérer la lumière (aujourd'hui les objectifs achromatiques composés pallient ce défaut).

Pour éviter ce défaut, il faut avoir une lentille avec une très longue focale.

Flamsteed (1649-1719) monta une lentille de 27 mètres de long à l'observatoire de Greenwich (créé en 1665).

Cassini (1625-1712) observera Saturne avec des réfracteurs dotés de focales de 5, 10, 31 puis 40 mètres de long.

Il devient difficile de fabriquer des cylindres rigides d'une telle longueur. On construit donc des télescopes à réfraction sans tube, en fixant la lentille sur un point élevé, et en pointant l'oculaire à la main sur la lentille.

En 1722, Bradley (1693-1762), qui a découvert le mouvement de nutation de la Terre, mesurera le diamètre angulaire de Vénus avec un réfracteur sans tube de focale de plus de 60 mètres !

Newton : le télescope à réflexion

En 1671, Newton va inventer un nouveau type de télescope : le télescope à réflexion.

La lumière est captée au moyen d'un **miroir** concave au fond du télescope et renvoyée dans l'oculaire qui se trouve alors latéralement dans la partie haute de la lunette.

C'est Herschel, le père de l'astronomie stellaire, qui va développer l'usage de ces télescopes à la fin des années 1760. Avec ses propres ressources, il fabriquera un réflecteur de 6 mètres de long et doté d'un miroir de 47 cm. Le plus grand télescope du monde sera construit en 1786 avec l'argent de la couronne d'Angleterre et sous la direction de Herschel : un réflecteur de 1,2 mètre de diamètre et 12 mètres de longueur focale.

En 1948, un réflecteur de 500 cm de diamètre est monté au Mont Palomar, en Californie.

Schématiquement, on peut dire que les télescopes à réfraction sont liés à l'astronomie du système solaire et les télescopes à réfraction liés à l'astronomie stellaire. On réabordera donc leur histoire dans le chapitre sur l'astronomie stellaire.

Les observatoires

Paris, Londres, Berlin (1705), Varsovie et Vilnius (1714), Moscou (1750).

En 1880 : 118 observatoires existent dans le monde : 84 en Europe, 27 en Amérique, 2 en Afrique, 2 en Asie et 3 en Océanie.

Conclusion

La révolution copernicienne, c'est d'abord le passage du géocentrisme à l'héliocentrisme.

La fin de la distinction entre le monde sublunaire et le monde supralunaire.

Cette révolution conduit ensuite au passage d'un monde clos à un univers infini.

Synthèse historique

1) La révolution copernicienne : un retournement mathématique sans preuve et sans remise en cause du monde aristotélicien.
2) Les observations « classiques » de Brahé : premières remises en cause du monde aristotélicien
3) Les lois des Kepler : le système copernicien prouvé. Remise en cause fondamentale du monde aristotélicien.
4) Les observations « modernes » de Galilée : mise à mort du monde aristotélicien.
5) Newton : synthèse de l'astronomie et de la physique.
6) L'étape suivante sera le développement de l'astronomie stellaire et de la théorie de la lumière.

Tableau synthétique des principales découvertes

Qui	Découvertes	Quand
Copernic	Système héliocentrique	1543
Brahé	Découverte d'une Nova	1572
	Disparition de la Nova	1574
	Comète située à six fois la distance de la Lune	1577
	Système géo-héliocentrique	1583
Kepler	**L'Astronomie nouvelle : 2 lois de Kepler**	**1609**
Galilée	La lunette astronomique	**1610**
	4 satellites de Jupiter	1610
	Plusieurs centaines d'étoiles	1610
	Les irrégularités de la Lune	1610
	Les tâches du Soleil	1610
	Les phases de Vénus	1610
	La forme étrange de Saturne	1610
Kepler	**L'Harmonie du Monde : 3ème loi**	**1618**
Kepler	**Les tables rudolphines**	**1627**
Gassendi	Vérification du système de Kepler : passage de Mercure devant le Soleil	1631
Horrocks	Vérification du système de Kepler : passage de Venus devant le Soleil	1639
Cassini	Mesure de la distance Terre-Soleil	1672
Newton	**Théorie de la gravitation universelle**	**1687**
Bradley	L'aberration des fixes	1729
Maupertuis Clairaut	La forme de la Terre	1737
Halley	Le retour de la comète de Halley	1759
Herschel	Découverte d'Uranus	1781
	Découverte de la ceinture d'astéroïdes	1801
	Découverte de Neptune	1846
	Découverte de Pluton	1930
	Découverte de la ceinture de Kuiper	1992

Critique d'une lecture classique de la révolution copernicienne

Sur l'anthropocentrisme

Dans leur histoire de l'image du Monde, Arkan Simaan et Joëlle Fontaine écrivent :

« Même si Copernic n'a pas eu pleine conscience des implications de sa pensée, son grand apport est incontestablement l'idée héliocentrique. Priver la Terre de sa place centrale dans l'Univers était une étape indispensable pour libérer la pensée occidentale de l'anthropocentrisme : le géocentrisme prolongeait l'idée chrétienne centrale de l'importance centrale de l'Homme, cet être créé à l'image et à la ressemblance de Dieu.

[…] Des questions venaient alors immédiatement à l'esprit : se pouvait-il que Dieu ait créé un être si important - l'Homme - dans un lieu si médiocre ?

On peut se demander si cette conception n'est pas directement issue de la lecture freudienne de l'histoire des sciences, lecture qui est elle-même une variante de la lecture comtienne. L'erreur d'une telle lecture est bien l'anachronisme dénoncé par Kuhn : la place géographiquement centrale de la Terre dans l'univers n'en est pas une spirituellement ou ontologiquement, bien au contraire. Le monde sublunaire est celui de la corruption, pas celui de la perfection.

La question « comment Dieu a-t-il pu créer l'homme dans un lieu si médiocre » n'a donc rien de révolutionnaire. A dire vrai, c'est le B.A.BA du christianisme !

Dans un premier temps, ce qui se passe est même exactement le contraire d'une déchéance : la Terre perd effectivement sa position géographique centrale, mais elle gagne une position ontologique divine : avec la révolution copernicienne, le Déterminisme descend sur Terre, autrement dit, le Divin.

Sur la scolastique

La modernité se présente souvent comme un combat contre la scolastique : la philosophie aristotélico-thomiste. Mais celle-ci peut se présenter comme un progrès, au XIIIème siècle, par rapport à l'idéalisme platonicien et augustinien.

Tout dans la constitution de la science moderne est ambivalent : les croyances astrologiques de Kepler, les croyances alchimiques de Newton, l'alchimie en tant que creuset de la chimie expérimentale. On peut considérer que le virage n'a pas été aussi brutal qu'il y paraît, à l'exception des expériences fondatrices : les Nouveaux Mondes de Collomb (1492) et de Galilée (1610).

Remarques sur l'évolution de la scientificité

Au XVIIème siècle, la scientificité moderne, c'est-à-dire la science expérimentale, n'est pas encore acquise. Ainsi, on constate que Galilée se désintéresse du travail astronomique de Kepler qui est pourtant pleinement scientifique et préfère en rester aux anciens dogmes, même s'ils ne rendent pas correctement compte des phénomènes. Il en est de même pour les cartésiens.

Les théories de Kepler et de Newton sont des théories scientifiques : elles rendent mieux compte des phénomènes que les théories précédentes.

La théorie de Copernic n'est pas à proprement parler une théorie scientifique. Pas plus que celle de Giordano Bruno. D'un point de vue scientifique, l'héliocentrisme de Copernic est une hypothèse qui est aussi plausible que le géocentrique. Le fait que cette hypothèse se soit avérée être la bonne ne fait pas pour autant de Copernic un scientifique au sens moderne.

À partir de l'avènement des lois de Newton, on rentre de plain-pied dans la science moderne.

Bibliographie

Littérature secondaire

Arkan Siman, Joëlle Fontaine : L'image du monde, des Babyloniens à Newton (Paris : ADAPT Editions, 2ème édition 1999). Principale source de ce cours, avec le livre de Timothy Ferris.

Arkan Siman : L'image du monde, de Newton à Einstein (Paris : Vuibert-ADAPT/SNES, 2005). Principale source de ce cours, avec le livre de Timothy Ferris.

Timothy Ferris : Histoire du cosmos de l'antiquité au big bang (Paris : Pluriel-Hachette, 1992 - 1ère édition en anglais en 1988). Principale source de ce cours, avec le livre de Arkan Siman et Joëlle Fontaine.

Arthur Koestler : Les somnambules (Paris : Calman Levy, 1980 - 1ère édition en anglais en 1958)

Ahmed Djebbar: Une histoire de la science arabe - Entretien avec Jean Rosmorduc (Paris : Le Seuil, 2001).

Daniel Benest : Les mémoires d'Uranie (Editions Burillier, 2003).

Charles-Albert Reichen : Histoire de l'astronomie (Editions Rencontre and Erik Nitsche International, 1963).

Yves Gingras, Peter Keating et Camille Limoges : Du scribe au savant : Les porteurs du savoir de l'Antiquité à la révolution industrielle (Boréal : Montréal, 1998).

Jean-Pierre Verdet : Histoire de l'astronomie ancienne et classique (PUF-Que sais-je : Paris, 1998)

Richard Westfall : Newton (Flammarion : Paris, 1994) - (édition originale en Américain : a biography of Isaac Newton - Cambridge University Press, 1980).

Littérature primaire

Tables alphonsines, avec les canons de Jean de Saxe (éditées par Emmanuel Poulle, CNRS Editions, 2001).

Tycho Brahé : Exercices de l'astronomie rénovée, livre I : de la nouvelle étoile de 1572, 1598 (traduction Jean Peyroux, diffusé par la librairie A. Blanchard, 9rue de Médicis, Paris 6ème, 1982).

Nicolas Copernic : Des révolutions des orbes célestes, 1543. (Diderot éditeur, arts et sciences, 1998. Traduction des douze premiers chapitres du livre I, introduction et notes par Alexandre Koyré) - (traduction du livre I dans : Stephen Hawking : Sur les Epaules des géants - Paris : Dunod éditeur, 2002 - pp. 11-66).

Johannes Kepler : Le secret du monde, 1595 (Les Belles Lettres : Paris, 1984)

Johannes Kepler : L'astronomie nouvelle, 1609 (traduction Jean Peyroux, 1979

Johannes Kepler : L'harmonie du monde, 1618 (traduction du livre V dans : Stephen Hawking : Sur les Epaules des géants - Paris : Dunod éditeur, 2002 - pp. 300-387).

Isaac Newton : Principes mathématiques de la philosophie naturelle, 1687 (traduction dans : Stephen Hawking : Sur les Epaules des géants - Paris : Dunod éditeur, 2002 - pp. 400-810).

Sites internet

http://www.obspm.fr/

Site de l'Observatoire de Paris

http://media4.obspm.fr/index.html

Site Astrophysique sur mesure de l'Observatoire de Paris